

Beitrag zum Präzisionsschmieden von Zahnrädern für Pkw-Getriebe

Vom Fachbereich Maschinenbau
der Universität Hannover
zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieur
genehmigte Dissertation
von

Dipl.-Ing. Claus Silbernagel
geboren am 09.06.1968 in Krefeld

2003

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Ernst-Günter Paland
1. Referent: Prof. Dr.-Ing. Eckart Doege
2. Referent: Prof. Dr.-Ing. Friedrich-Wilhelm Bach

Tag der mündlichen Prüfung: 30.05.03

Vorwort

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

Herrn Prof. Dr.-Ing. E. Doege, dem Leiter des Institutes, danke ich für die freundliche Unterstützung und die fruchtbaren Gespräche bei der Durchführung dieser Arbeit.

Mein Dank gilt auch Herrn Prof. Dr.-Ing. F.-W. Bach für die Übernahme des Korreferates und Herrn Prof. Dr.-Ing. E.-G. Paland für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission.

Außerdem danke ich allen Kollegen und Mitarbeitern des Institutes, die mich bei der Durchführung und Fertigstellung dieser Arbeit unterstützt haben. Besonders erwähnen möchte ich die Zusammenarbeit mit Frank Meiners, Dirk Fischer, Steffen Kulp, Jens Gue, Günter Klawitter, Dr. Jan Dittmann und Dr. Samer Abdelfattah, die durch ihre persönliche Unterstützung zum Gelingen der Arbeit beigetragen haben.

Mein spezieller Dank gilt meinen Eltern, die die Grundlage für meinen akademischen Werdegang gelegt haben, sowie meinen Geschwistern für vielerlei Hilfe.

Hannover, Juni 2003

Kurzzusammenfassung

Unternehmen in allen Bereichen der produzierenden Industrie sind in einen globalen Wettbewerb eingebunden. So wird die deutsche Schmiedeindustrie häufig mit Preisforderungen konfrontiert, die betriebswirtschaftlich schwer erreichbar sind. Nur durch die Einführung neuer Produktionstechnologien kann der Forderung, Bauteile mit hoher Qualität auch wirtschaftlich zu fertigen, begegnet werden. Das Präzisionsschmieden stellt in dieser Hinsicht ein sehr aussichtsreiches Fertigungsverfahren dar. Es ermöglicht gegenüber dem konventionellen Gesenkschmieden höhere Maßgenauigkeiten. Neben der Reduzierung des Nachbearbeitungsaufwands ergibt sich eine bessere Ausnutzung des Materialeinsatzes. Zudem kann die Bauteilbelastbarkeit durch bessere mechanische Eigenschaften erhöht werden.

Besonders aufgrund der hohen Stückzahlen und ihrer Qualitätsanforderungen stellen Zahnräder ein Bauteilspektrum dar, das sich für die Herstellung durch Präzisionsschmieden anbietet. Zahnräder werden derzeit mit wenigen Ausnahmen durch spanende Fertigungsverfahren hergestellt, daher sind Verzahnungsgeometrien in der Regel auf diese Fertigungsverfahren ausgelegt.

Einer industriellen Herstellung komplexer Zahnradgeometrien durch Präzisionsschmieden stehen nicht für die umformtechnische Herstellung angepasste Verzahnungsgeometrien und fehlendes Wissen zum Aufbau der komplexen Werkzeugsysteme und zur Einstellung der qualitätsbestimmenden Einflussgrößen des Umformprozesses in Abhängigkeit von der Bauteilgeometrie entgegen.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine Verzahnungsgeometrie für die Fertigung durch Präzisionsschmieden ausgelegt und im Prozess untersucht. Die Auslegung wurde auf Basis einer klassischen Pkw-Verzahnung als Referenz durchgeführt. Die umformtechnisch optimierte Verzahnung führte im Vergleich zur Referenzverzahnung im Prozess zu geringeren Umform- und Ausstoßkräften.

Des Weiteren wurde ein dreistufiges Werkzeugsystem entwickelt, das die Möglichkeit einer wirtschaftlichen Herstellung von schrägverzahnten Zahnrädern durch das Präzisionsschmieden ausgehend von Vollmaterial als Rohteil erlaubt. Zur Auslegung der Stadienfolge mit optimaler Werkzeugvor- und Zwischenformgeometrie mit daraus resultierendem optimalem Werkstofffluss und Gravurfüllungsverhalten wurden FEM-Simulationen genutzt.

Für die umformtechnische Fertigung eines Gangrades mit hinterschnittener Kupplungsverzahnung wurde ein Werkzeugsystem mit radial entformenden Segmenten zur Erzeugung der hinterschnittenen Kupplungsverzahnung entwickelt und konstruiert. Mit diesem Werkzeug ist die integrierte Fertigung von Grundkörper mit allen Funktionselementen, einbaufertiger Kupplungsverzahnung und Laufverzahnung mit geringem Schleifaufmaß möglich.

Schlagworte: Präzisionsschmieden, Zahnrad, Kupplungsverzahnung, Pkw-Getriebe

Abstract

Companies in all divisions of the manufacturing industry are involved in the global competition. Therefore the German forging industry is often confronted with price requirements which can be hardly fulfilled economically. The demand for producing components with high qualities at reasonable costs can only be realized by the application of new production technologies. Precision forging represents a very promising manufacturing method in this respect. When compared to conventional drop forging it enables a higher accuracy of measurements. Next to the reduction of expenses for follow-up treatment it also supplies a better utilization of the inventory. Moreover the load capacity of the parts can be extended with better mechanical properties.

The gears represent a component spectrum which is suitable for precision forging production especially because of the large scale manufacture and its quality requirements. At the moment gear wheels are usually manufactured by cutting manufacturing methods, therefore, the geometries for gear tooth forming are normally designed for this manufacturing method.

An industrial production of complex gear wheel geometries through precision forging is opposed by unfitted geometries for gear tooth forming for deformation manufacture and the lack of knowledge concerning the construction of complex tool systems and the proper adjustment of parameters for quality control of the forming process in dependence to the components geometry.

In the course of this research a tooth geometry was designed for manufacture through precision forging and was examined in the process. The design was implemented on the basis of a classic passenger car gear wheel as reference. In the process the optimized gear tooth form caused lower forming- and ejection forces compared to reference gear tooth forms.

Furthermore a three-step tool system was developed which allows an economical production of helical gears by precision forging based on full material as the raw part. FEM-simulations were used for designing the sequence of stages with optimized tool-preform geometry and intermediate form geometry with resulting optimal material flow and gravure filling behavior.

For the production of a gear wheel with undercut coupling gear teeth based on deformation technology a tool system were developed and constructed with radial ejecting segments for generating the undercut coupling gear teeth. With this tool the integrated production of the main body with all functional elements as well as ready-to-install coupling- and running gears with low material allowances for grinding is possible.

Keywords: precision forging, gear-wheel, coupling gear tooth, car transmission

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis der Formelzeichen und Abkürzungen.....	III
1 Einleitung	1
2 Stand der Kenntnisse.....	3
2.1 Gesenkschmieden	3
2.1.1 Einordnung in die Fertigungsverfahren.....	3
2.1.2 Wirtschaftliche und technologische Bedeutung des Gesenkschmiedens	7
2.2 Massivumformung von Zahnrädern.....	12
2.2.1 Vorteile der umformtechnischen Herstellung	14
2.2.2 Umformverfahren zur Herstellung von Verzahnungen.....	15
2.3 Stand der Technik zum Präzisionsschmieden von Zahnrädern	17
2.4 Anforderungsprofil für Zahnräder von Pkw-Getrieben	23
3 Entwicklungsbedarf.....	28
4 Zielsetzung	29
5 Auslegung von Verzahnungen für die umformtechnische Herstellung	32
5.1 Konstruktive Gesichtspunkte	32
5.2 Auslegung einer umformtechnischen Verzahnung.....	35
5.2.1 Auslegung der Vorverzahnung.....	39
6 Präzisionsschmieden von Pkw-Gangrädern ausgehend von Vollmaterial.....	40
6.1 Auslegung des Schmiedeteils.....	40
6.2 Konzeption des Werkzeugs	41
6.3 Umformmaschine.....	47
6.4 Auslegung der Stadienfolge mit Hilfe der FEM.....	49
6.4.1 Vor- und Zwischenformauslegung des Umformprozesses.....	50
6.4.2 Optimierte Stadienfolge und Werkstofffluss.....	53
6.4.3 Thermische und mechanische Werkzeugbelastung	54
6.4.4 Temperatur, Umformgrad und Spannungen im Präzisionsschmiedeteil.....	56

6.5	Werkzeugkonstruktion	58
6.5.1	Unterwerkzeug	59
6.5.2	Oberwerkzeug.....	63
6.5.3	Modularer Aufbau des Werkzeugsystems	65
6.6	Beschreibung des Umformvorgangs	68
6.7	Prozessuntersuchung und Bauteilqualität	71
7	Präzisionsschmieden von Pkw-Gangrädern mit Kupplungsverzahnung.....	89
7.1	Auslegung des Schmiedeteils.....	92
7.2	Konzeption des Werkzeugs	93
7.3	Werkzeugkonstruktion	94
7.4	Beschreibung des Umformvorgangs	100
7.5	Prozessuntersuchung und Bauteilqualität	104
7.6	Vorteile des Verfahrens	110
8	Übersicht der Formeln zur Auslegung von Werkzeug und Prozess.....	113
9	Zusammenfassung und Ausblick.....	115
10	Literaturverzeichnis.....	118

Verzeichnis der Formelzeichen und Abkürzungen

Formelzeichen

Zeichen	Einheit	Bedeutung
a	[mm]	Achsabstand
b	[mm]	Zahnbreite
d	[mm]	Teilkreisdurchmesser
d _a	[mm]	Kopfkreisdurchmesser
d _b	[mm]	Grundkreisdurchmesser
d _f	[mm]	Fußkreisdurchmesser
d _i	[mm]	Bohrungsdurchmesser
d _x	[mm]	Wälzkreis
E	[N/mm ²]	Elastizitätsmodul
F _A	[N]	Ausstoßkraft
F _{AN}	[N]	Anschlagkraft
f _{Form}	[%]	Formfüllung
F _G	[N]	Gestellkraft
f _{Hα}	[μm]	Profil-Winkelabweichung
F _{Hβ}	[μm]	Flankenlinien-Winkelabweichung
F _N	[N]	Nennkraft der Umformmaschine
F _U	[N]	Umformkraft
i	-	Übersetzung
k _f	[N/mm ²]	Fließspannung des Werkstoffes
L _A	[dB]	Anregungspegel
m	[kg]	Masse
m	-	Reibfaktor
m _n	[mm]	Normalmodul
p _i	[N/mm ²]	Werkzeuginnendruck
s	[mm]	Stößelweg

s_H	[mm]	Länge des Hinterschnittes
s_{min}	[mm]	minimale Strecke des Gravursegmentes zur Entformung
T_U	[°C]	Rohteiltemperatur
T_{WS}	[°C]	Werkstücktemperatur
z	-	Zähnezahl
α_n	[°]	Normaleingriffswinkel
β	[°]	Schrägungswinkel
ε_α	-	Profilüberdeckung
ε_β	-	Sprungüberdeckung
ε_γ	-	Gesamtüberdeckung

Formelzeichen, die hier nicht aufgeführt sind, werden in den jeweiligen Kapiteln erläutert.

Abkürzungen

IDS	Industrieverband Deutscher Schmieden
OT	Oberer Totpunkt der Umformmaschine
OWZ	Oberwerkzeug (Kap. 6.4)
UT	Unterer Totpunkt der Umformmaschine
UWZ	Unterwerkzeug (Kap. 6.4)
VDA	Verband der Automobilindustrie
RV	Referenzverzahnung der Pkw-Getrieberadpaarung (Kap. 5.2)
UV	Umformtechnische Verzahnung der Pkw-Getrieberadpaarung (Kap. 5.2)
FEM	Finite-Elemente-Methode

1 Einleitung

Unternehmen in allen Bereichen der produzierenden Industrie sind in einen globalen Wettbewerb eingebunden. So wird die deutsche Schmiedeindustrie häufig mit Preisforderungen konfrontiert, die betriebswirtschaftlich schwer erreichbar sind. Nur durch die Einführung neuer Produktionstechnologien kann der Forderung, Bauteile mit hoher Qualität auch wirtschaftlich zu fertigen, begegnet werden.

In dieser Hinsicht stellt das Präzisionsschmieden ein sehr aussichtsreiches Fertigungsverfahren dar. Als ein Sonderverfahren des Gesenkschmiedens ermöglicht es gegenüber dem konventionellen Gesenkschmieden höhere Maßgenauigkeiten. Neben der Reduzierung des Nachbearbeitungsaufwands ergibt sich hierbei außerdem eine bessere Ausnutzung des Materialeinsatzes. Zudem kann die Bauteilbelastbarkeit durch bessere mechanische Eigenschaften erhöht werden /Mage79/. Durch die Einsparung von Material und Fertigungsschritten ergibt sich somit ein ökonomisches Potential und ferner durch höhere Bauteilfestigkeiten ein technologisch qualitatives Potential.

Besonders aufgrund der hohen Stückzahlen und ihrer Qualitätsanforderungen stellen Zahnräder ein Bauteilspektrum dar, das sich für die Herstellung durch Präzisionsschmieden anbietet. Zahnräder werden derzeit mit wenigen Ausnahmen durch spanende Fertigungsverfahren hergestellt. Daher sind Verzahnungsgeometrien in der Regel auf dieses Fertigungsverfahren ausgelegt. Spanende Verfahren bedingen durch den durchbrochenen Faserverlauf Einbußen in Bezug auf die Bauteilfestigkeit sowie durch den Spanabfall und eine hohe Anzahl an Prozessschritten wirtschaftliche Nachteile gegenüber einer Prozesskette mit endkonturnaher umformtechnischer Fertigung und spanender Hartfeinbearbeitung.

Mit der umformtechnischen Herstellung von Pkw-Getriebezahnrädern nahe an der Endform hat die Schmiedeindustrie eine Möglichkeit, sich ein bedeutendes Marktsegment zu erschließen. Die Präzisionsumformung von Zahnrädern stellt nur dann eine Alternative zum konventionellen (spanenden) Herstellungsprozess dar, wenn es gelingt die hervorragenden Festigkeiten präzisionsgeschmiedeter Zahnräder bei geringeren Kosten nutzbar zu machen.

Die industrielle Herstellung komplexer Zahnradgeometrien durch Präzisionsschmieden setzt die Entwicklung von geeigneten Werkzeugsystemen voraus, die verfahrensbedingt gegenüber konventionellen Schmiedewerkzeugen wesentlich komplexer aufgebaut sind.

Bei der Anpassung von Zahnradgeometrien an die umformtechnische Herstellung sind die speziellen Anforderungen (wie z.B. Laufruhe und Tragfähigkeit), die an Zahnräder für Pkw-Getriebe gestellt werden, zu berücksichtigen. Zudem fehlt häufig die Kenntnis der Einstellungen des Umformprozesses in Abhängigkeit von der jeweiligen Bauteilgeometrie.

Systematische Untersuchungen sind die Voraussetzung zur Erlangung dieses Wissens. Wirtschaftliche Vorteile werden bei der Realisierung einer endkonturnahen Fertigung und der Substitution mehrerer Fertigungsschritte der spanenden Herstellung durch den Umformprozess erreicht.

Im Rahmen dieser Arbeit wird nachgewiesen, dass eine Optimierung der Verzahnungsgeometrie sich positiv auf die Prozessgestaltung beim Präzisionsschmieden auswirkt.

Mit Hilfe eines mehrstufigen Prozesses wird gezeigt, wie schrägverzahnte Zahnräder durch Präzisionsschmieden ausgehend von Vollmaterial hergestellt werden können.

Eine besondere Herausforderung ist die umformtechnische Herstellung von Hinterschnitten, die durch das Entformungsproblem mit umformtechnischen Verfahren schwer herstellbar sind. Es wird ein Werkzeugsystem dargestellt, welches sowohl die Formung des Zahnrades inklusive der Lauf- und hinterschnittener Kupplungsverzahnung in den Umformprozess integriert. Damit wird die gesamte Prozesskette erheblich verkürzt.

Die Untersuchungen dieser Arbeit sollen für die Werkzeug- und Prozessauslegung für das Präzisionsschmieden von Zahnrädern für Pkw-Getriebe einen wesentlichen Beitrag leisten.

2 Stand der Kenntnisse

Das Präzisionsschmieden ist ein Sonderverfahren des Gesenkschmiedens. Im Stand der Kenntnisse werden die theoretischen Grundlagen und der Stand der Technik zum Präzisionsschmieden von Zahnrädern dargestellt. Es werden die wirtschaftlichen und technologischen Potentiale dieses Verfahrens ausgeführt sowie die Bedeutung dieses Verfahrens für die deutsche Schmiedeindustrie aufgezeigt. Des Weiteren werden die Forderungen der Automobilhersteller an Pkw-Getrieberäder erläutert.

2.1 Gesenkschmieden

2.1.1 Einordnung in die Fertigungsverfahren

Unter Umformen wird nach DIN 8580 die gezielte Änderung der Form eines Werkstückes mit Beherrschung der Geometrie verstanden, wobei Masse und Zusammenhalt des Materials erhalten bleiben. Eine Unterscheidung der Umformverfahren findet nach DIN 8582 nach dem **Spannungszustand in der Umformzone** statt. Das Gesenkschmieden gehört nach DIN 8583 zur Gruppe der Druckumformverfahren. Das Präzisionsschmieden gehört als umformtechnisches Fertigungsverfahren zum Gesenkschmieden. Druckumformen ist Umformen eines festen Körpers, wobei der plastische Zustand im wesentlichen durch ein- oder mehrachsige Druckbeanspruchung herbeigeführt wird. Das Gesenkschmieden wird nach dem Ordnungspunkt **Werkzeuggeometrie** (DIN 8583) weiter unterteilt in Gesenkschmieden mit und ohne Grat (Bild 2.1).

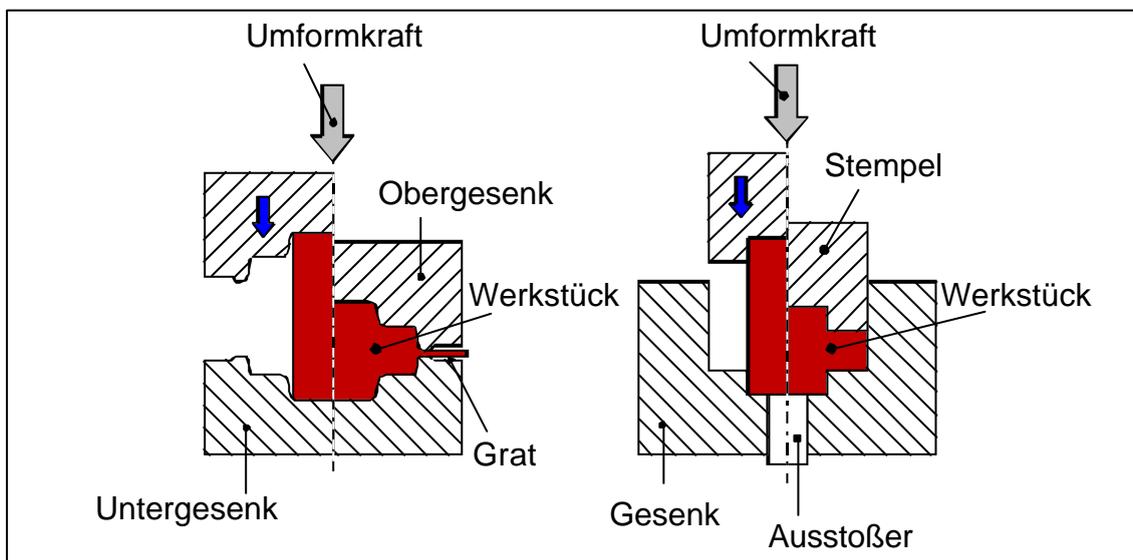


Bild 2.1: Links: Gesenkschmieden mit Grat, rechts: Schmieden im geschlossenen Gesenk ohne Grat (DIN 8583)

Gesenkschmieden ohne Grat ist ein Umformen mit ganz umschlossenem Werkstück, wobei kein Werkstoff nach außen entweichen kann. Das Gesenkschmieden mit Grat ist ein Umformen mit umschlossenem Werkstück, wobei überschüssiger Werkstoff durch

einen Gratspalt abfließen kann. Beim Schmieden im geschlossenen Gesenk werden zwei wesentliche Wirkprinzipien unterschieden. Das Gesenk kann durch den Pressstempel verschlossen werden (Bild 2.1, rechts). Voraussetzung hierbei ist, dass der Stempel mit einer axialen Bewegung in das Gesenk eindringt und das Werkstück eine Entformung über die Gesenköffnung zulässt. Bei komplexen Werkstückgeometrien wird das Gesenk über ein oder mehrere Schließelemente (Bild 2.2) verriegelt. Die Öffnung des Gesenkes wird dabei durch eine von Federn aufgebrachte Schließkraft verhindert. Die Schließkraft kann auf das Obergesenk wirken (Bild 2.2, links) oder aber auf das Untergesenk (Bild 2.2, rechts). Mit diesem Werkzeugprinzip können beispielsweise schrägverzahnte Zahnräder geschmiedet werden.

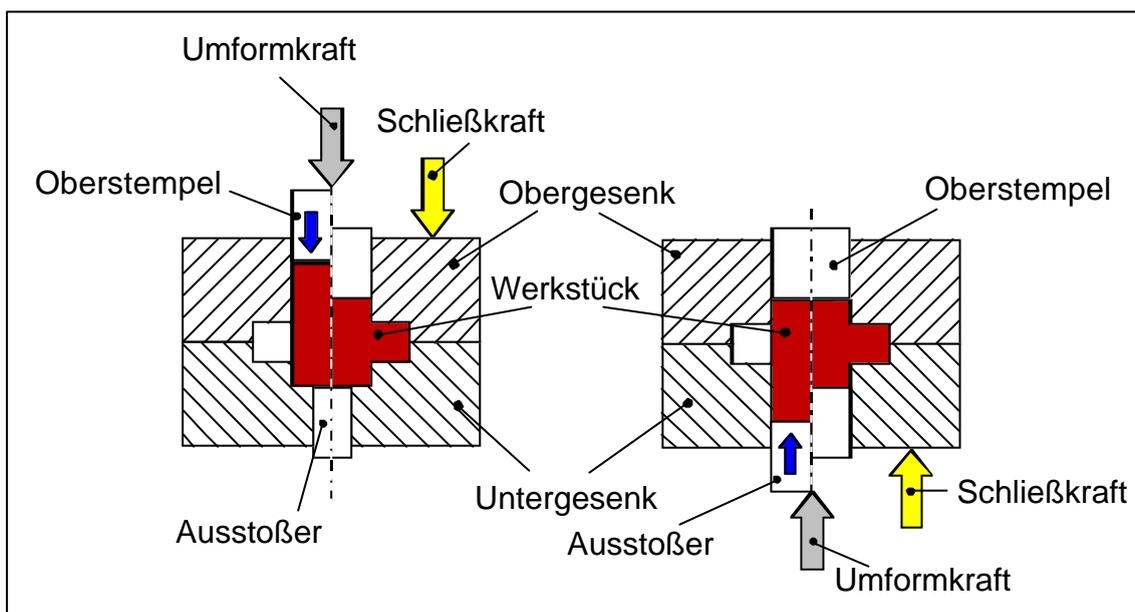


Bild 2.2: Schmieden im geschlossenen Gesenk: links: Schließkraft wirkt am Obergesenk, rechts: Schließkraft wirkt am Untergesenk

Eine Differenzierung der Verfahren des Gesenkschmiedens wird auch in Abhängigkeit von der **Wirkrichtung** des Werkstoffflusses vorgenommen, Vorwärts-, Rückwärts- oder Querfließpressen sowie in Abhängigkeit von der Werkstückendform, Voll-, Hohl- und Napffließpressen.

Eine weitere Differenzierung der Verfahren kann nach der Temperatur des Rohteils durchgeführt werden. Nach DIN 8582 werden die zur Umformtechnik zählenden Fertigungsverfahren in Abhängigkeit von den Werkstoffeigenschaften des Rohteils bei verschiedenen **Temperaturen** ausgeführt. So lassen sich die Umformverfahren nach der Einsatztemperatur einteilen in das Warmumformen (ca. 900 – 1250°C), Halbwarmumformen (ca. 600 – 900°C) und das Kaltumformen (ohne vorherige Erwärmung des Rohteils).

Maßtoleranzen für Gesenkschmiedeteile

Gesenkschmiedeteile aus Stahl werden toleriert nach der Norm DIN 7526. Bei engeren Toleranzen (IT 9-12, DIN ISO 286) wird von **Genausmiedern** und bei weiterer Einengung der Toleranzen (IT 6-9 DIN ISO 286) von **Präzisionssmiedern** gesprochen, wobei Toleranzen von IT 6-7 nur mit zusätzlichen Sonderverfahren wie dem Kaltkalibrieren zu erreichen sind. /NN95/

Gegenüber dem Schmieden mit Grat sind entscheidende Vorteile des Präzisionsschmiedens die optimale Werkstoffausnutzung und der geringe Nachbearbeitungsaufwand der Schmiedeteile, was zu erheblichen wirtschaftlichen Vorteilen führen kann. Bei richtiger Abstimmung von Rohteilvolumen und Gravurvolumen erfordert das Schmieden ohne Grat geringere Kräfte als das Schmieden mit Grat. Zudem hat ein präzisionsgeschmiedetes Bauteil bessere mechanische Eigenschaften durch einen ununterbrochenen Faserverlauf. /Lang77/

Anforderungen an Werkzeug und Prozess beim Präzisionsschmieden

Das Präzisionsschmieden bietet durch die Reduzierung des der Umformung folgenden Bearbeitungsaufwands Möglichkeiten zur Verkürzung der gesamten Prozesskette. Hierin wird ein Kostensenkungspotential zu anderen Verfahren gesehen. Um die erhöhten Ansprüche an die Maß- und Formgenauigkeit von Präzisionsschmiedeteilen realisieren zu können, müssen an das Werkzeugsystem und den Prozess folgende Anforderungen gestellt werden. Die Anforderungsliste ist entscheidend für die später umsetzbare Qualität des Prozesses:

1. Genaue Werkzeugauslegung und -fertigung
2. Hohe Volumen- und Geometriegenauigkeit der Rohteile
3. Genaue Temperaturführung
4. Werkzeugführung, genaue Stößelführung (geringe Kippung und Verlagerung)
5. Genauigkeit der Prozessführung
6. Hohe Stabilität des Prozesses
7. Hohe Reproduzierbarkeit der Prozessparameter der Umformmaschine

1. Genaue Werkzeugauslegung und -fertigung

Die engen Toleranzen der Präzisionsschmiedeteile stellen hohe Ansprüche an die Werkzeugauslegung. Bei der Werkzeugauslegung ist sowohl die Schrumpfung des Werkstücks als auch die elastische Werkzeugdehnung vorzuhalten. Um Schmiedeversuche zur Optimierung des Werkzeugs zu reduzieren und damit Entwicklungskosten

zu minimieren, wird die Simulation mittels der Finite-Elemente-Methode (FEM) in die Produkt- und Verfahrensentwicklung mit einbezogen. Durch Simulation können bereits vor dem Bau der Werkzeuge Aussagen über die Güte des Prozesses, insbesondere über evtl. zu erwartende Umformfehler in den Bauteilen wie Überlappungen und Risse gemacht werden. /Näge95, Doeg01/ (vgl. Bild 6.9) Die FEM eignet sich auch hervorragend zur Auslegung von Stadienfolgen. Darüber hinaus kann mit dieser Methode eine Optimierung hinsichtlich Werkstofffluss und Werkzeugbelastung durchgeführt werden (vgl. Kap. 6.4).

2. Hohe Volumen- und Geometriegenauigkeit der Rohteile

Das Volumen des Rohteils beeinflusst stark das Prozessergebnis. Ein zu geringes Rohteilvolumen führt zu einer unvollständigen Formfüllung, ein zu hohes Rohteilvolumen führt zu einem Überlaufen oder einer Überlastung des Gesenkes. Beim Auftreten von Einlege- und Positionierungsfehlern der Rohteile kommt es zu einem unerwünschten Werkstofffluss und damit zu Geometrieabweichungen am Schmiedeteil zudem steigt der Werkzeugverschleiß an.

3. Genaue Temperaturführung

Die Temperatur des Rohteils bei der Umformung wirkt sich auf die Maß- und Formgenauigkeit des Werkstückes aus, da sie über die Schrumpfung die Werkstückgeometrie beeinflusst. Eine Überwachung der Rohteil- und Werkzeugtemperatur ist deshalb zwingend erforderlich. Die Verzunderung der Rohteile während der Erwärmung ist so gering wie möglich zu halten. Zunder kann aus der Oberfläche des Bauteils herausbrechen und diese damit schädigen bzw. zum Ausschuss des Teiles führen. /Behr97, Lang77/

4. Werkzeugführung, genaue Stößelführung (geringe Kippung und Verlagerung)

Ein Säulenführungsgestell zwischen Ober- und Unterwerkzeug sollte verwendet werden, um die Montage sowie die richtige Positionierung des Werkzeuges in der Umformmaschine zu erleichtern. Eine genaue Positionierung der Werkzeuge zueinander kann auch durch alternative Führungselemente im Schmiedewerkzeug ermöglicht werden.

Bei der Umformmaschine ist eine hohe Führungsgenauigkeit sowie eine große horizontale Steifigkeit notwendig, um Kippungs- und Versatzerscheinungen möglichst zu vermeiden und so eine hohe Teilegenauigkeit zu gewährleisten.

5. Genauigkeit der Prozessführung

Die Prozesseingangsgrößen bestimmen die Qualität der Schmiedeteile. Eine gleichbleibend hohe Fertigungsqualität kann nur bei Variation der Eingangsgrößen in geringen Grenzen erreicht werden. Somit sind möglichst konstante Transferzeiten, Einlegepositionen, Schmier- und Kühlstoffmengen, Werkzeug- und Rohteiltemperaturen etc. zu gewährleisten.

6. Hohe Stabilität des Prozesses

Durch die Aufnahme von Prozessgrößen kann der Präzisionsschmiedeprozess kontinuierlich überwacht werden und bei Abweichungen von beispielsweise der Umform-, Ausstoß-, Gestellkraft oder Rohteiltemperatur von den Sollwerten eingegriffen werden. Um eine Bewertung der gemessenen Prozessgrößen zu ermöglichen, müssen die Prozessgrößen bekannt sein, bei denen die vorgegebenen Toleranzen erreicht werden. Des Weiteren sollten, wenn möglich, entscheidende Qualitätsparameter der Bauteile überwacht werden.

7. Hohe Reproduzierbarkeit der Prozessparameter der Umformmaschine

Das Präzisionsschmieden stellt besondere Ansprüche an die Umformmaschine. Um eine gleichbleibend hohe Qualität der Präzisionsschmiedeteile zu erreichen, dürfen die Prozessparameter des Umformvorgangs nur geringen Schwankungen unterliegen. Bei einer Kurbelpresse können diese Abweichungen der Prozessstabilität infolge von Führungsspiel durch Verschleiß und Wärmedehnung der Maschine zustande kommen. Speziell bei Kupplungsspindelpressen ist beispielsweise von Nachteil, dass der Abschaltpunkt des Antriebs kurz vor dem unteren Totpunkt u.U. schwankt. Gemindert wird dieser Nachteil durch das Auffahren auf Anschlagsäulen.

Zur Erreichung hoher Gesenkstandmengen muss die Umformmaschine eine möglichst kurze Druckberührzeit ermöglichen, um den Wärmeübergang vom Werkstück in das Gesenk zu minimieren. /Doeg99b/

2.1.2 Wirtschaftliche und technologische Bedeutung des Gesenkschmiedens

Zur Fertigung von Stahlbauteilen setzt die deutsche Schmiedeindustrie eine Vielzahl von Verfahren ein. Die Bedeutung der einzelnen Schmiedeverfahren kann in [Bild 2.3](#) abgelesen werden. Darin sind die Produktionszahlen der deutschen Schmiedeindustrie des Jahres 2000 dargestellt. In diesem Jahr wurden insgesamt 2,2 Mio. t Schmiedeteile hergestellt. Das Gesenkschmieden hat mit einem Anteil von 68% die größte wirtschaftliche Bedeutung aller Schmiedeverfahren in Deutschland.

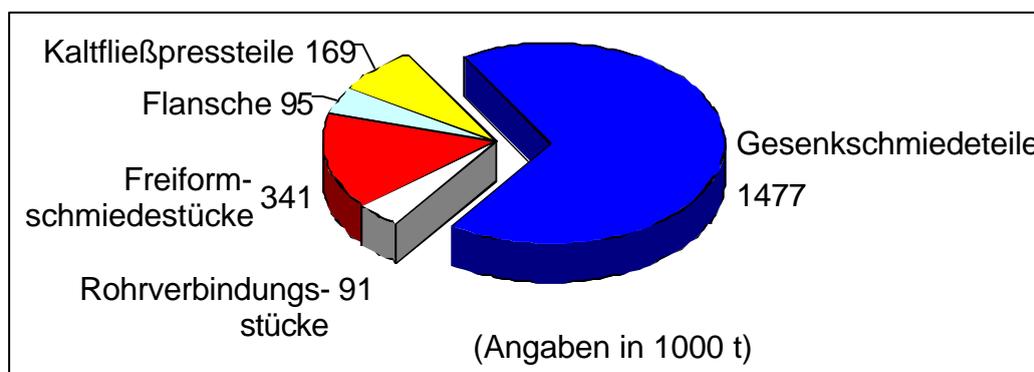


Bild 2.3: Produktion der deutschen Schmiedeindustrie im Jahr 2000 aufgeteilt nach Verfahrensgruppen (Gesamttonnage 2,2 Mio. t) /IDS02/

Der größte Teil der Gesenkschmiedeteile wird durch Schmieden mit Grat hergestellt (vgl. Bild 2.1, links). Dieser Grat wird in einem nachfolgenden Fertigungsschritt entfernt.

Die Produktionsmenge der deutschen Schmiedeindustrie an Gesenkschmiedeteilen hat im Vergleich zu den anderen europäischen Staaten (Bild 2.4) mit 41% den größten Anteil an der europäischen Gesamtproduktionsmenge. Global gesehen ist die Schmiedeindustrie immer dort sehr stark, wo auch die Automobilindustrie vertreten ist.

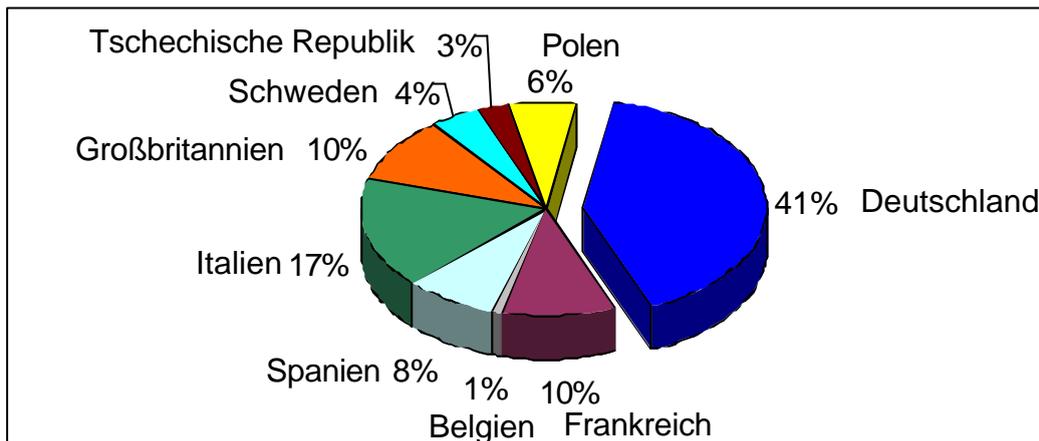


Bild 2.4: Anteil der führenden europäischen Anbieterländer an der Gesamtproduktionsmenge von Gesenkschmiedeteilen im Jahr 1998 in Europa (Gesamttonnage 2.368.000 t) /Vier98/

Abnehmerstruktur der deutschen Schmiedeindustrie und Wettbewerbssituation

Bild 2.5 gibt einen Überblick über die Marktstruktur der deutschen Gesenkschmiedeindustrie.

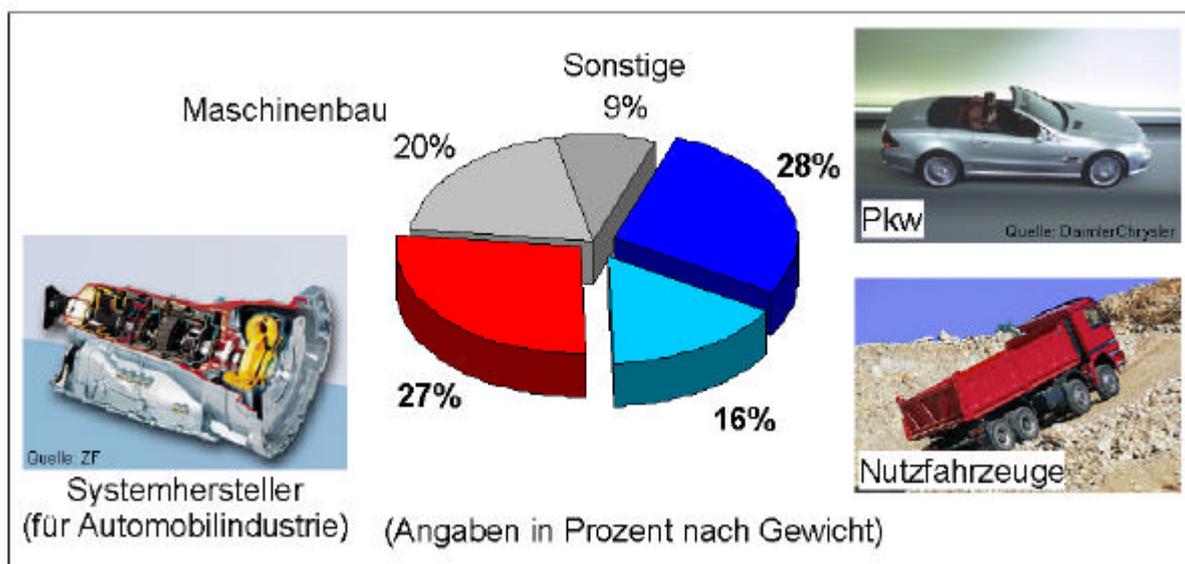


Bild 2.5: Inländische Abnehmerstruktur der deutschen Gesenkschmiedeindustrie im Jahr 2000 /IDS02/

Bei den Marktanteilen der wichtigsten inländischen Abnehmerbereiche nehmen die Pkw- und Nutzfahrzeugindustrie und die Systemhersteller zusammen 71% ein. /IDS02/ Systemhersteller beliefern die Automobilindustrie und entwickeln komplette Baugruppen für Fahrzeuge, wie beispielsweise Getriebe (vgl. Bild 2.5). Zu den wichtigsten Systemlieferanten von Pkw-Getrieben gehören die Unternehmen Getrag AG und ZF Friedrichshafen AG.

Damit ist der Markt der Schmiedeindustrie in starkem Maße abhängig von den Anforderungen der Fahrzeugindustrie. Daraus folgt, dass von den Automobilherstellern ein hoher Druck hinsichtlich der Kosten auf die Schmieden ausgeübt werden kann. /Ruda00, West97b, Zer97/ Durch die Zusammenschlüsse verschiedener Automobilfirmen (z.B. DaimlerChrysler, Ford Volvo) und durch eine konsequente Durchführung der „Gleichteile-Strategie“ werden die Stückzahlen pro Baueinheit erhöht. Somit kann der Druck auf den Zulieferer erhöht werden /Hirs99/. Die deutsche Schmiedeindustrie ist daher gefordert, Potentiale zur Kostenreduzierung zu suchen und die Produktqualität bei reduzierten Kosten ständig zu verbessern. /Herb99/

Weiterhin wird der Kostendruck durch die Konkurrenz von Anbietern aus Niedriglohnländern verstärkt. Um keine Marktanteile zu verlieren, ist es für die deutsche Schmiedeindustrie unerlässlich, ihre Prozesse zu verbessern und Bauteile hoher Qualität anzubieten. /Tsuc98/ Mit dem Präzisionsschmieden können nahezu einbaufertige Werkstücke mit hohen Genauigkeiten in großen Stückzahlen produziert werden. Für die Entwicklung neuer Verfahren und qualitativ hochwertiger Produkte bilden wissenschaftliche Untersuchungen eine unerlässliche Basis.

Einsatzbereiche von Schmiedeteilen im Pkw

Schmiedeverfahren zeichnen sich durch folgende Merkmale aus: Hohe Produktivität, niedrige Stückkosten, minimaler Werkstoffverbrauch, funktionsgerechte Produkteigenschaften. Schmiedeteile weisen eine hohe Formenvielfalt auf und eignen sich deshalb für die Herstellung eines großen Spektrums von Produkten. Durch eine ständige Weiterentwicklung der Schmiedeverfahren können immer komplexere Geometrien gefertigt werden /Hirs00/. Vorteile der Massivumformung gegenüber den spanenden Fertigungsverfahren sind der beanspruchungsgerechte Faserverlauf und gegenüber spanenden Verfahren andere geometrische Gestaltungsmöglichkeiten /Lang77/.

Entsprechend der hohen Produktqualität und den sehr guten mechanischen Eigenschaftswerten, die Schmiedeteile aufweisen, werden diese hauptsächlich in den Bereichen hoher Beanspruchung und dort wo ein hohes Maß an Betriebssicherheit benötigt wird, eingesetzt. Sie sind vor allem für kraft- und bewegungsübertragende Bauteile besonders geeignet. Diese sind im Automobil vor allem in den Komponenten **Motor**, **Getriebe**, **Antriebsstrang** und **Fahrwerk** zu finden (Bild 2.6). /Hirs99/ Besonders gegenüber Gussteilen haben Schmiedeteile beim Einsatz in sicherheitsrelevanten Be-

reichen und beim Leichtbau Vorteile. Gussteile weisen Poren auf, die bis zu 2% des Bauteilvolumens einnehmen können. Poren entstehen durch die Schrumpfung des Gussteiles beim Übergang vom flüssigen in den festen Zustand und schwächen das Bauteil, so dass Gussteile gegenüber Schmiedeteilen bis zu 20% schwerer ausgelegt werden müssen.

Gesenkschmiedeteile werden in der Regel nach der Umformung noch spanend nachbearbeitet, da beim klassischen Gesenkschmieden mit Grat mit relativ großen Aufmaßen gearbeitet wird, die eine reine Hartfeinbearbeitung sowohl ökonomisch (z.B. geringes Zeitspannvolumen beim Schleifen) als auch technologisch (komplexe Form der Schmiedeteile) effektiv nicht zulassen.

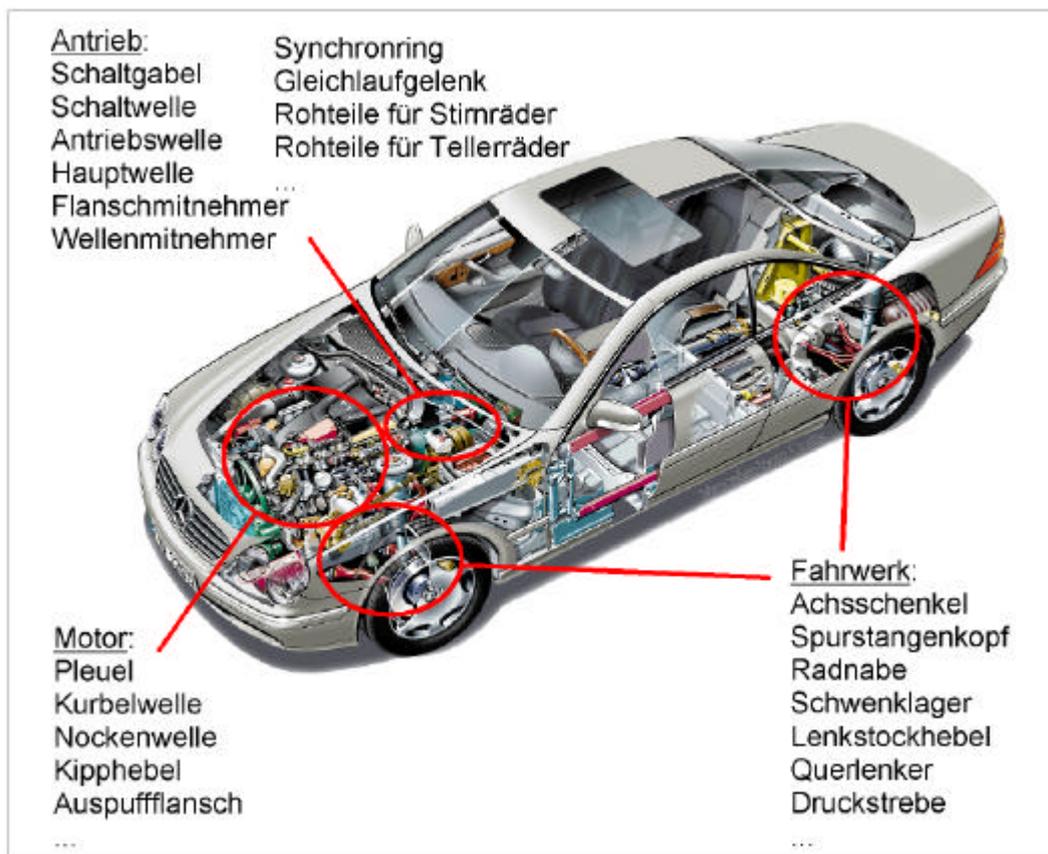


Bild 2.6: Typische Einsatzbereiche von Gesenkschmiedeteilen im Pkw aus den Baugruppen Antrieb, Motor und Fahrwerk (Bild: DaimlerChrysler)

Bild 2.7 zeigt ausgewählte Schmiedeteile, wie sie im Antriebsstrang eines Pkws eingesetzt werden. Schaltwellen, Hauptwellen, Antriebswellen, Schaltgabeln und Synchronringe sind Bauteile, die in Handschaltgetrieben von Pkw verbaut werden.

Für die Zahnräder von Pkw-Getrieben werden heute überwiegend Gesenkschmiedeteile als Rohteile mit großem Aufmaß für die spanende Weiterbearbeitung hergestellt.

Solche Rohteile sind in Bild 2.7 die geschmiedeten Vorformen für Stirnräder und Tellerräder. Für diese Zahnräder ergibt sich kein belastungsangepasster Faserverlauf, da

die Fasern durch die spanende Bearbeitung zertrennt werden. Somit können die mechanisch technologischen Eigenschaften von Schmiedeteilen nicht eingestellt werden. Eine Ausnahme bildet das Kegelrad, welches einbaufertig durch Präzisionsschmieden und Kaltkalibrieren bereits heute industriell hergestellt wird. Umformtechnisch hergestellte Kegelräder weisen gegenüber gespannten bessere mechanische Eigenschaften auf.



Bild 2.7: Ausgewählte Schmiedeteile für Pkw aus dem Bereich Antrieb, (Quelle: IDS)

Kostenverteilung für die Herstellung von Gesenkschmiedeteilen

Die Kosten für die Herstellung von Gesenkschmiedeteilen verteilen sich auf die Bereiche Material, Werkzeuge, Umformprozess, Qualität und Sonstiges. Bild 2.8 zeigt die Anteile dieser Bereiche an den Gesamtkosten beispielhaft für Fahrwerksbauteile. Es ist jeweils der Durchschnitt über verschiedene Werkstücke aus dem Fahrwerksbereich dargestellt. Die Umformkosten enthalten alle Kosten des Schmiedeprozesses wie Trennen, Erwärmen, Umformen etc., die Qualitätskosten fallen durch Maßnahmen zur Qualitätssicherung an.

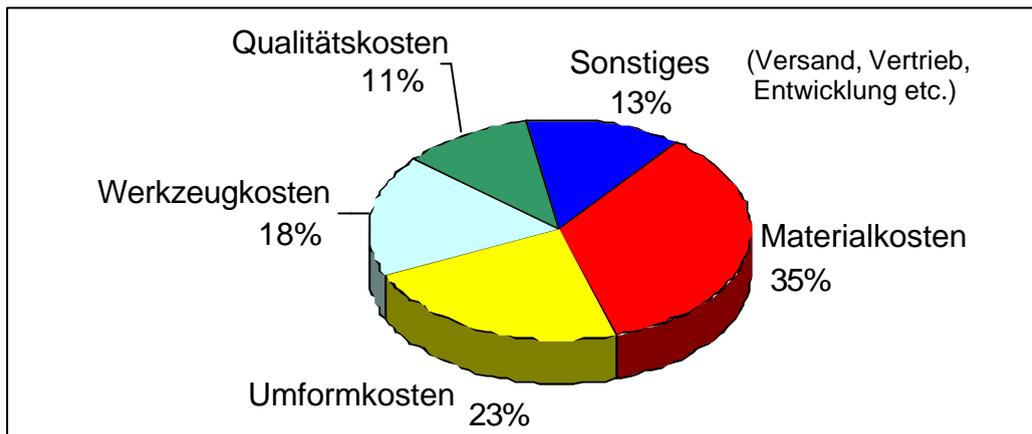


Bild 2.8: Kostenverteilung für geschmiedete Fahrwerksbauteile /Pedd99/

Mit einem Anteil von 35% nehmen die Materialkosten den höchsten Anteil an den Herstellkosten ein, so dass die Optimierung des Materialeinsatzes eines der vorrangigen Ziele bei der Herstellung von Gesenkschmiedeteilen sein sollte. Das Verhältnis von Einsatz- zu Schmiedefertigteilgewicht muss verbessert werden. Der zweite große Kostenanteil wird durch den Umformprozess selbst verursacht. Dies liegt vor allem an den hohen Anschaffungs- und Betriebskosten der Umform-Aggregate. Die Werkzeugkosten haben einen Anteil an den Gesamtkosten von 18%. In diesem Anteil machen sich Maßnahmen zur Erhöhung der Standmenge der Werkzeuge bemerkbar. In den sonstigen Kosten enthalten sind der Versand, der Vertrieb und die Entwicklung. /Pedd99/

2.2 Massivumformung von Zahnrädern

Zur Erzeugung von Zahnrädern werden eine Vielzahl von Verfahren eingesetzt. Kriterien für die Auswahl eines Verfahrens ist die Wirtschaftlichkeit und die erreichbare Genauigkeit. /Grav96/ Bei der Herstellung von Verzahnungen wird hinsichtlich der erreichbaren Qualität zwischen Verfahren der Vorverzahnung und der Feinbearbeitung unterschieden. /Weck98/

Als Übersicht sind in Bild 2.9 die wichtigsten Verfahren zur Zahnradfertigung zusammengestellt. Zur Herstellung der Vorverzahnung wird zwischen spanlosen (ur- und umformenden) und spanabhebenden Verfahren unterschieden. Bei der spanenden Herstellung wird auch häufig ein Gesenkschmiedeteil als Rohteil verwendet. /Felt99/

Bei großen Aufmaßen folgt eine Weichfeinbearbeitung danach eine Wärmebehandlung und gegebenenfalls eine Hartfeinbearbeitung. Bei Zahnrädern (z.B. Kegelrädern) die umformtechnisch endkonturnah hergestellt werden, folgt eine Wärmebehandlung mit anschließender Hartfeinbearbeitung.

Die Formung von Nebenformelementen und des Zahnradgrundkörpers bleibt in Bild 2.9 unberücksichtigt.

Um spanend möglichst wirtschaftlich zu fertigen, aber auch eine hohe Verzahnungsgenauigkeit zu erzielen, wird die Vorverzahnung zunächst mit möglichst hohen Schnittgeschwindigkeiten und großen Vorschüben verzahnt, anschließend erfolgt nach einer Wärmebehandlung die Hartfeinbearbeitung.

Zur spanenden Herstellung der Vorverzahnung dienen hauptsächlich das Wälzfräsen, das Wälzstoßen und für Großverzahnungen das Wälzhobeln. Alternative Verfahren der Vorverzahnungsherstellung sind urformend das Gießen, umformend die Kaltumformung, das Pulverschmieden, das Schmieden, Präzisionsschmieden und das Walzen. Bei den Feinbearbeitungsverfahren im Anschluss an eine Wärmebehandlung ist in erster Linie das Schleifen (Wälz- und Formschleifen) zu nennen. /Weck98/ Diese Feinbearbeitungsverfahren werden auch bei der Hartfeinbearbeitung von umformend hergestellten Vorverzahnungen eingesetzt. Umformverfahren haben neben den spanenden Verfahren zur Fertigung von Vorverzahnungen die größte Bedeutung /Roth98/.

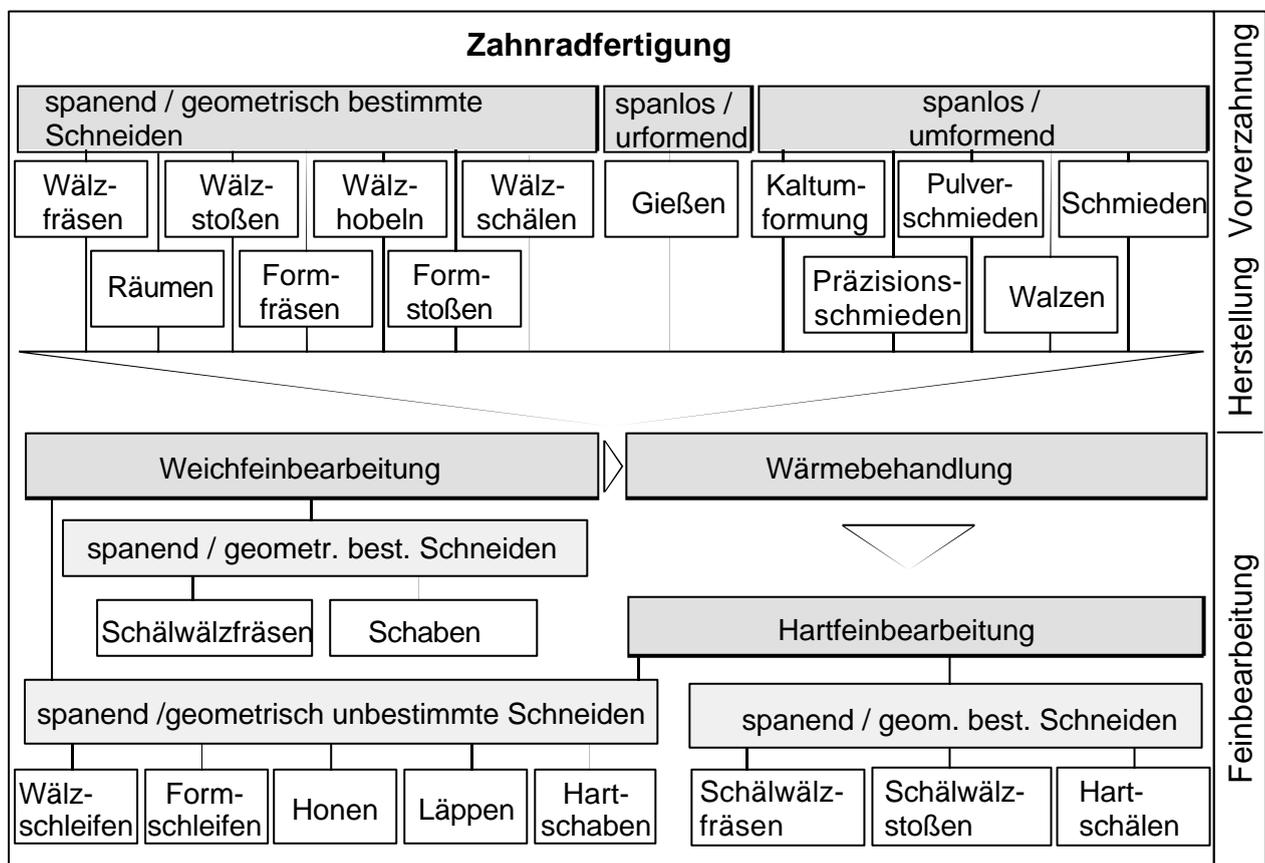


Bild 2.9: Verfahren zur Zahnradfertigung, nach /Felt99/

Vorzugsweise findet die Weichfeinbearbeitung dann statt, wenn die aus einer Wärmebehandlung resultierenden Form- und Maßgenauigkeiten im Rahmen der zulässigen Bauteiltoleranzen liegen und somit auf eine abschließende Hartfeinbearbeitung verzichtet werden kann. Andererseits kann durch eine vorherige Weichfeinbearbeitung der Aufwand der Hartfeinbearbeitung reduziert werden. /Weck98/

Bestehen hohe Anforderungen an Leistungsfähigkeit und Laufruhe eines Getriebes, so ist der Einsatz qualitativ hochwertiger Zahnräder notwendig, die nur durch eine Hart-

feinbearbeitung nach der Wärmebehandlung hergestellt werden kann (z.B. Pkw-Getriebe).

2.2.1 Vorteile der umformtechnischen Herstellung

Spanende Verfahren zur Fertigung von Zahnrädern weisen gegenüber umformtechnischen einige Nachteile auf, wie den hohen Materialverbrauch, den unterbrochenen Faserverlauf, die Notwendigkeit von Werkzeugausläufen und somit einer Einengung in der konstruktiven Gestaltung sowie hohe Fertigungskosten bei hohen Stückzahlen.

Die teilweise umformtechnische Herstellung von Zahnrädern bietet sich aufgrund verschiedener technologischer und konstruktiver sowie ökonomischer Vorteile als Alternative zu einer rein spanenden Herstellung an. (Bild 2.10)

Technologische Vorteile	Konstruktive Vorteile	Ökonomische Vorteile
<ul style="list-style-type: none"> ● beanspruchungsgerechter Faserverlauf 	<ul style="list-style-type: none"> ● optimierte Geometrie des Zahnfußes 	<ul style="list-style-type: none"> ● geringer Materialverlust
<ul style="list-style-type: none"> ● endkonturnahe Fertigung 	<ul style="list-style-type: none"> ● im Gegensatz zu spanenden Verfahren keine Werkzeugausläufe notwendig 	<ul style="list-style-type: none"> ● relativ kurze Fertigungszeiten
<ul style="list-style-type: none"> ● integrierte Fertigung von Nebenformelementen (z.B. Kupplungsverzahnung) 		<ul style="list-style-type: none"> ● Substitution von Fertigungsschritten
<ul style="list-style-type: none"> ● hohe Zahnfußfestigkeit 		<ul style="list-style-type: none"> ● einfache Automatisierbarkeit

Bild 2.10: Technologische, konstruktive und ökonomische Vorteile der umformtechnischen Teil-Fertigung von Zahnrädern

Umformtechnische Fertigungsverfahren eignen sich für die Serienproduktion mit hohen Stückzahlen. Sie zeichnen sich durch **ökonomische** Vorteile wie hohe Produktivität, Prozesssicherheit, relativ kurze Fertigungszeiten und einen äußerst geringen Materialverlust aus.

Voraussetzung für den Einsatz umformender Verfahren zur Zahnräderfertigung ist die Erreichung von Kostenvorteilen gegenüber der konventionellen (spanenden) Fertigung. Eine umformtechnische Herstellung ermöglicht die Substitution eines Teiles oder sogar der gesamten spanenden Weichbearbeitung (z.B. für die Losräder in Bild 2.19) und damit eine erhebliche Verkürzung der Prozesskette. Die Entscheidung zu Gunsten der umformtechnischen Herstellung der Vorverzahnung wird erleichtert durch die Tatsache, dass mit dem heutigen Präzisionsschmieden sehr geringe Bearbeitungsaufmaße für die sich der Wärmebehandlung anschließende Hartfeinbearbeitung erreicht werden können.

Weiterhin bietet die umformtechnische Herstellung von Zahnrädern auch **technologische** Vorteile. Umformtechnisch hergestellte Bauteile werden vor allem dann verwendet, wenn hohe statische und dynamische Belastungen aufzunehmen sind. Sie werden aus diesem Grund vor allem für kraft- und bewegungsübertragende Bauteile eingesetzt. /Lang77/ Hauptgrund hierfür ist der optimierte, der Belastung im Betrieb des Zahnrades angepasste Faserverlauf.

Konstruktive Vorteile beruhen auf den spezifischen Formgebungsmöglichkeiten umformtechnischer Verfahren. Da sie im Gegensatz zu den spanenden Verfahren wie Fräsen, Stoßen oder Schleifen keine Werkzeugausläufe benötigen. Dieser verfahrenstechnische Vorteil ermöglicht beispielsweise bei Gangrädern mit Kupplungsverzahnung eine wesentlich kompaktere Gestaltung des Zahnradgrundkörpers (vgl. Bild 7.3).

Umformtechnisch sind Zahnfußausrundungen formbar, die spanend nicht herstellbar sind. Durch eine optimierte Rundung kann am Zahnfuß eine Vermeidung von Spannungsspitzen erreicht werden, so dass eine höhere Zahnfußfestigkeit erreicht wird. /Voss87/

2.2.2 Umformverfahren zur Herstellung von Verzahnungen

Massivumformverfahren zur Herstellung von Zahnrädern sind aus dem Bereich der **Warmumformung** das Pulverschmieden und das Präzisionsschmieden. Aus dem Bereich der **Kaltumformung** das Fließpressen und Taumelpressen. Hinzu kommen **Walzverfahren** wie das Längs- und Querwalzen (Bild 2.11).

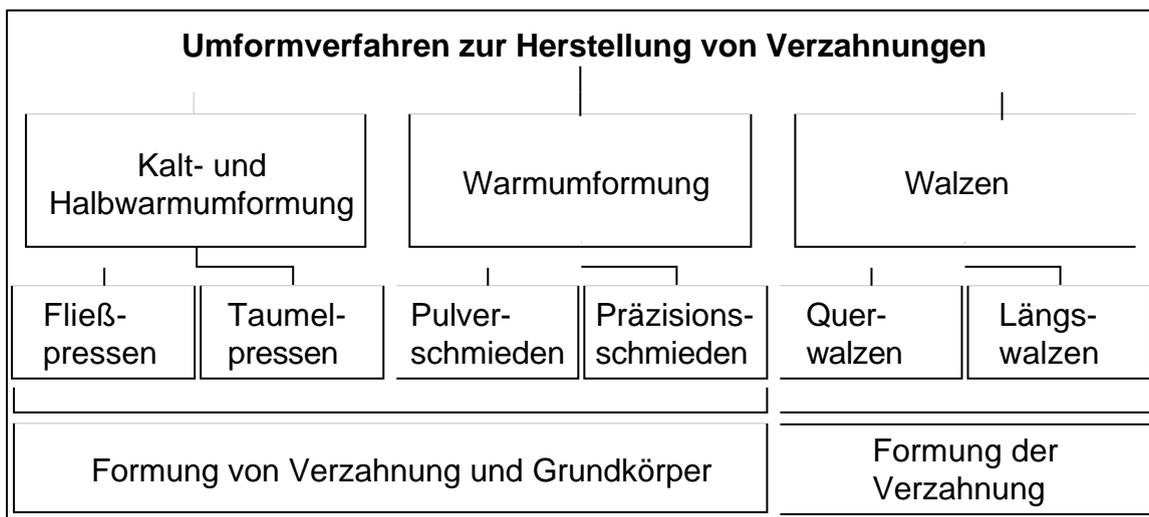


Bild 2.11: Umformverfahren zur Herstellung von Verzahnungen

Walzverfahren ermöglichen ausschließlich die Formung der Verzahnung. Mit den anderen Verfahren kann in einer oder mehreren Umformstufen die Verzahnung inklusive Zahnradgrundkörper und Nebenformelementen geformt werden.

2.2.2.1 Walzen

Die Walzverfahren zur Herstellung von Verzahnungen werden nach DIN 8582 in Quer- und Längswalzen unterschieden. Die Verzahnung wird durch Kaltumformung an zylindrischen Rohteilen erzeugt. Beim Längswalzen wird das Halbzeug senkrecht zu den Walzachsen ohne Drehung durch den Walzspalt geführt. Beim Querwalzen wird das Rohteil ohne Bewegung in Achsrichtung um die eigene Achse gedreht.

2.2.2.2 Kalt- und Halbwarmumformung

Die Verfahren der Kalt- und Halbwarmumformung ermöglichen die Herstellung von Bauteilen mit hoher Maßgenauigkeit und Oberflächengüte.

Fließpressen

Samanta /Sama75/ entwickelte ein Verfahren zum Fließpressen. Es erlaubt die Herstellung von gerad- und schrägverzahnten Zahnrädern in Vorverzahnungsqualität durch Hohlvorwärtsfließpressen. Ein Rohrabschnitt wird über einen Dorn durch eine verzahnte Matrize gepresst und nach dem Einlegen eines zweiten Rohteils vollständig ausgepresst.

Dieses Prinzip des Hohl-Vorwärtsfließpressens wurde von weiteren Autoren untersucht /Koll90, Lütt96/. Auch die Verfahren Querfließpressen /Schm93/ und das Napfformstauen /Wieb00, Lauf91/ wurden zur Herstellung von Zahnrädern untersucht und beschrieben. Die Zahnräder weisen in der Regel einfache Grundkörper auf und sind aufgrund der verfahrensbedingt geringen realisierbaren Umformgrade für die Fertigung von Pkw-Getriebe-Zahnrädern nicht tauglich. So findet das Kaltfließpressen von Verzahnungen ausschließlich Anwendung bei Zahnrädern kleiner Dimension. /Schm82, Geig90/

Taumelpressen

Beim Taumelpressen führt das Obergesenk eine Taumelbewegung aus. Das Werkzeug wirkt auf eine lokal begrenzte Umformzone. Das taumelnde Obergesenk wird auf dem Werkstück abgewälzt. Durch die auftretende Rollgleitreibung kann die Reibkraft gering gehalten werden, so dass der Werkstoff mit geringem Widerstand in radialer Richtung fließen kann. /Köni86/

2.2.2.3 Warmumformung

Pulverschmieden

Das Pulverschmieden besteht aus den Fertigungsschritten Sintern und Schmieden. Bei diesem Verfahren werden gesinterte Rohteile verwendet, die zuvor unter hohem Druck aus Metallpulvern gepresst wurden. Der Fertigungsablauf besteht aus den Schritten Pulverpressen, Wiegen, Sintern, Wiedererwärmen und Schmieden. /Köni90/ Die mechanischen Eigenschaften der durch Pulverschmieden hergestellten Zahnräder sind vom eingesetzten Werkstoff und der im Bauteil vorhandenen Restporosität abhängig. Gerad- und schrägverzahnte Zahnräder sind mit diesem Verfahren herstellbar. /Köni88/ Es sind nicht die Festigkeiten von geschmiedeten Zahnrädern zu erreichen, auch die Taktzeiten sind gegenüber dem Schmieden wesentlich länger.

Präzisionsschmieden

Das Präzisionsschmieden als Gesenkschmiedeverfahren ist geeignet, Schmiedeteile herzustellen, deren Kontur möglichst nahe an der Fertigteilkontur liegt. Die Anzahl an Fertigungsstufen kann verkürzt und der Aufwand der Nachbearbeitung reduziert werden. Das Verfahren ist für die Zahnradherstellung interessant, da sich aufgrund der großen möglichen Umformgrade schmiedetechnisch in einem Prozess mehrere Form- und Nebenformelemente erzeugen lassen. Es ist somit eine Alternative zu spanabhebenden Fertigungsverfahren. /Bohn99, Doeg98b, Doeg99c, Doeg02/

2.3 Stand der Technik zum Präzisionsschmieden von Zahnrädern

Mit dem Präzisionsschmieden ist gegenüber den Verfahren der Kalt- und Halbwarmumformung ein größerer Umformgrad erzielbar. Das Pulverschmieden ist ein Verfahren, welches gegenüber dem Präzisionsschmieden aufwendigere Rohteile und eine längere Prozesskette benötigt. Somit hat das Präzisionsschmieden gegenüber diesen umformtechnischen Verfahren für das Bauteilspektrum der Pkw-Gangräder Vorteile.

Präzisionsschmieden von Kegelrädern

Das Präzisionsschmieden findet heute bereits für ausgewählte verzahnte Bauteile industrielle Anwendung. Erfolgreich wird es bereits bei Kegelrädern eingesetzt. Präzisionsschmiedete Kegelradverzahnungen werden heute in nahezu allen Achsen moderner Nutzfahrzeuge eingesetzt (Bild 2.12). /West97, Yosh98, Doug98/

Die Kegelräder werden je nach Einsatzfall in der Verzahnung entweder geschmiedet und anschließend kalt kalibriert oder geschmiedet und in den Zahnflanken geschliffen. /Nebe99/



Bild 2.12: Präzisionsgeschmiedetes Kegelrad, Werkstoff: 1.7131 (16MnCr5)

Präzisionsschmieden von Stirnrädern

Für Stirnräder findet das Präzisionsschmieden lediglich Anwendung für geradverzahn- te Planetenritzel für Nutzkraftfahrzeuge und Landmaschinen. Hier wirkt sich aufgrund der großen Einsatzmasse in besonderer Weise die Materialeinsparung des umform- technischen Verfahrens aus. /Lind83/

Bild 2.13 verdeutlicht die bessere Materialausnutzung der schmiedetechnischen Her- stellung. Im linken Teil des Bildes ist das Gesenkschmiedeteil gezeigt, wie es für die konventionelle spanende Verzahnungsherstellung als Rohteil eingesetzt wird. In Bild 2.13, rechts ist das in mehreren Stufen ausschließlich präzisionsgeschmiedete Zahnrad zu sehen.

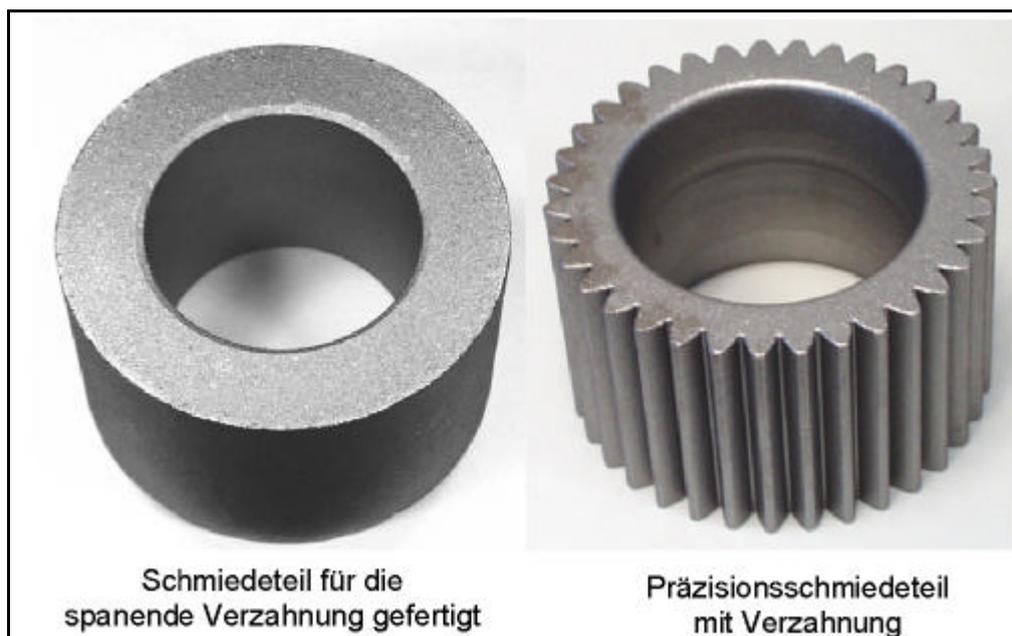


Bild 2.13: Links: Schmiedeteil für die spanende Verzahnung gefertigt, rechts: Präzisionsschmiedeteil mit Verzahnung /Diet02/

Dieses Zahnrad weist noch ein Schleifaufmaß von 0,2 mm auf den Zahnflanken auf und ist nach Wärmebehandlung und der anschließenden Hartfeinbearbeitung einbaufertig.

Die Innenbohrung wird in beiden Fällen durch Lochen erstellt und muss stets nachbearbeitet werden. Beim Präzisionsschmiedeteil ergibt sich gegenüber dem spanend hergestellten Ritzel mit geschmiedetem Halbzeug eine um 33% höhere Materialausnutzung. /Diet02/

Bisher werden industriell noch keine schrägverzahnten Zahnräder mit Laufverzahnung präzisionsgeschmiedet. Schräge Laufverzahnungen werden derzeit industriell ausschließlich durch spanende Verfahren erzeugt.

Die Forschungstätigkeit am Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen (IFUM) hat in den letzten Jahren dazu geführt, dass für unterschiedliche Zahnradgeometrien Verfahren des Präzisionsschmiedens entwickelt wurden. Ausgewählte Bauteile aus dieser Forschungstätigkeit sind in Bild 2.14 zusammengestellt.



Bild 2.14: Gerad- und schrägverzahnte präzisionsgeschmiedete Zahnräder für unterschiedliche Anwendungsfälle (IFUM)

Adams entwickelte einen Präzisionsschmiedeprozess zur Fertigung kleiner geradverzahnter Ritzel mit einbaufertiger Verzahnung. Die Ritzel wurden durch ein Querfließpressen von Rohrhalfzeug auf einem Werkzeug mit schwimmend gelagerter Matrize gefertigt. Eine solche Matrize ermöglicht auf einfachwirkenden Pressen eine zweifache Krafteinleitung. /Adam90, Adam90b/

Westerkamp entwickelte ein Werkzeugsystem zum einstufigen Präzisionsschmieden eines einfachen schrägverzahnten Stirnrades ohne Nebenformelemente. Aufgrund der erreichten Genauigkeiten der Verzahnungen musste nach dem Präzisionsschmieden und der Wärmebehandlung lediglich noch eine abschließende Hartfeinbearbeitung durchgeführt werden. /West96/

Behrens automatisierte einen Präzisionsschmiedeprozess für ein gradverzahntes Zahnrad und entwickelte ein Qualitätsprüfungssystem über die Zusammenhänge zwischen Prozessparametern und Qualitätsmerkmalen. /Behr97/

Bohnsack untersuchte in umfangreichen statistisch abgesicherten Versuchsreihen systematisch den Einfluss von Schmiedeparametern auf Prozess- und Bauteilgrößen beim Präzisionsschmieden von schrägverzahnten Zahnrädern. Dabei wurden Zahnräder bis zu einer Masse von 900g und Schrägungswinkeln bis zu 35° einstufig präzisionsgeschmiedet. /Bohn99b/

Präzisionsschmieden von Kupplungsverzahnungen

Das Präzisionsschmieden von Zahnrädern hat besonders große ökonomische Vorteile bei Zahnrädern mit Nebenformelementen (vgl. Bild 2.10). Die Losräder in Pkw-Handschatgetrieben (vgl. Bild 2.19) besitzen als Nebenformelemente eine hinterschnittene Kupplungsverzahnung.

Zur umformtechnischen Herstellung von hinterschnittenen Kupplungsverzahnungen von Pkw-Gangrädern werden in der Regel mehrstufige Prozesse eingesetzt. Ausgehend von einem geschmiedeten Zahnradgrundkörper mit Kupplungsverzahnung ohne Hinterschnitt, wird in einem Kalibriervorgang der Hinterschnitt geformt. Zu solchen Verfahren gibt es zahlreiche Patentanmeldungen. /Naok90, Ohok88, BLW86, BLW86b/ Über sich radial schließende Schieberelemente wird nach /Naok90/ der Hinterschnitt an der Kupplungsverzahnung geformt. Nach /BLW86/ werden Kupplungszähne mit anfänglich parallelen Flanken, deren Zahnköpfe Übermaß aufweisen, durch einen Kalibriervorgang aufgeweitet. Dabei werden die Zahnköpfe auf das erforderliche Maß gestaucht und die Zahnflanken erhalten eine der Hinterschneidung entsprechende Schrägung, wobei diese sich frei ausbildet und damit nicht immer höchsten Genauigkeitsanforderungen entspricht. Ein ähnliches Verfahrensprinzip zur umformtechnischen Formung der Hinterschnitte ist in /BLW86b/ beschrieben.

Mit der Nutzung der Gestaltungsmöglichkeiten der Umformtechnik lassen sich funktionale und wirtschaftliche Vorteile gegenüber konventionell hergestellten Gangrädern mit Kupplungsverzahnung erreichen. Durch eine vertieft liegende Kupplungsverzahnung, die zu einer Verringerung der Zahnradhöhe führt, wird eine Gewichtsreduzierung erreicht (Bild 2.15). Umgeformte, gerundete Funktionskanten am Kupplungszahn mindern den Verschleiß und erhöhen den Komfort beim Schalten im Betrieb. Die Dä-

cher der Kupplungszähne sind umformtechnisch mit symmetrischen und asymmetrischen Flächen darstellbar. /West97, Gutm98/

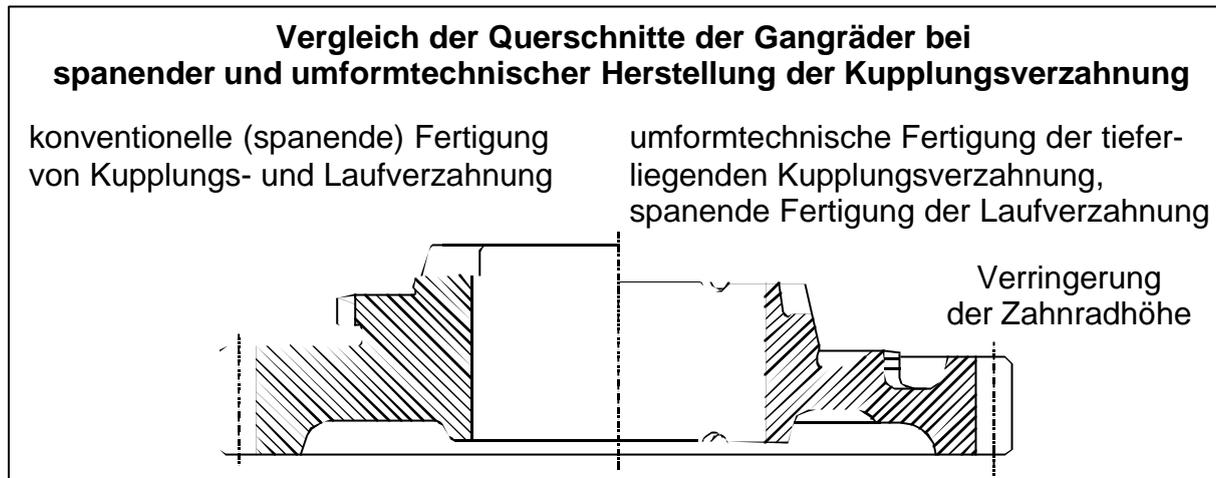


Bild 2.15: Vergleich der Querschnitte der Gangräder bei rein spanender und teilweise umformtechnischer Herstellung (Quelle: Thyssen Umformtechnik)

In **Bild 2.16** ist ein solches Gangrad dargestellt. Es wird in einem Schmiedeprozess mit Grat mit einbaufertiger Kupplungsverzahnung gefertigt. Die schrägverzahnte Laufverzahnung muss hier noch gefräst werden. Mit den umformtechnischen Konstruktionsmöglichkeiten wird bei präzisionsgeschmiedeten Gangrädern eine Verringerung der Baulänge des Schaltgetriebes erreicht. /West97/

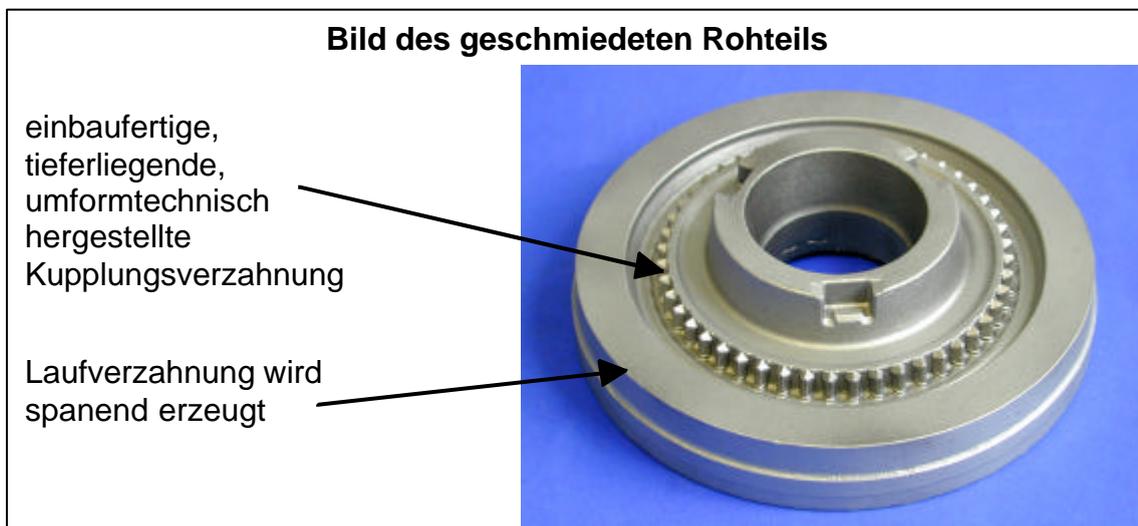


Bild 2.16: Geschmiedetes Rohteil mit einbaufertiger Kupplungsverzahnung für die spanende Fertigung der Laufverzahnung (Quelle: Thyssen Umformtechnik)

Dreyer /Drey00/ entwickelte nach dem beschriebenen Prinzip der Hinterschnitteinbringung über radial schließende Schieberelemente ein Verfahren zum Präzisions-schmieden von Pkw-Gangrädern mit einem anschließenden Kalibrieren zur Formung des Hinterschnittes der Kupplungsverzahnung aus der Umformwärme. **Bild 2.17** zeigt das Gangrad mit Kupplungs- und Laufverzahnung und einigen Verzahnungsdaten.



Bild 2.17: Gangrad mit hinterschnittener Kupplungsverzahnung präzisionsgeschmiedet und kalibriert /Drey00/

In der ersten Umformstufe wird das Gangrad vollständig inklusive der Laufverzahnung bis auf die Hinterschneidung im Bereich der Kupplungsverzahnung geschmiedet. Die Formung des Hinterschnittes an der Kupplungsverzahnung erfolgt in der zweiten Umformstufe. Über Schrägführungen am Stößel, die die vertikale Stößelbewegung in eine horizontale Bewegung wandeln, wird der Antrieb der Schieber Elemente bewerkstelligt (Bild 2.18).

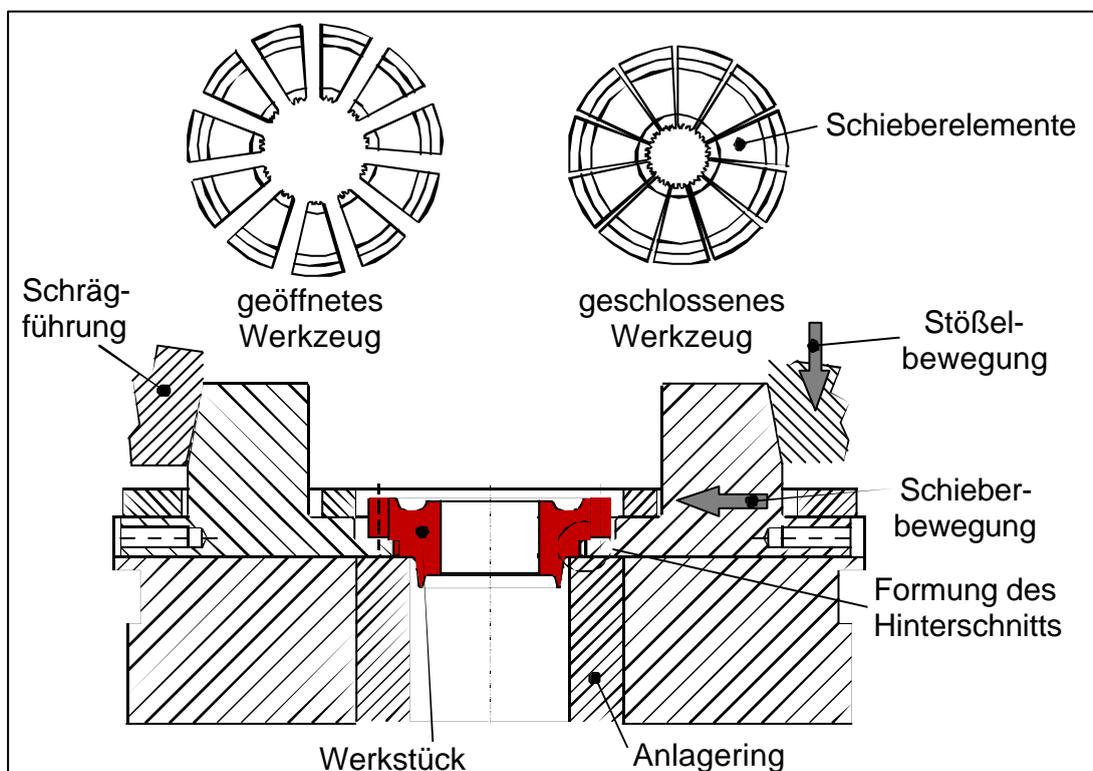


Bild 2.18: Werkzeugsystem zur Hinterschnittterzeugung an der Kupplungsverzahnung bei Pkw-Gangrädern (siehe Bild 2.17) /Drey00/

Bei der Formung des Hinterschnittes wird Material lokal aus dem Bereich der Hinterschneidung verdrängt. Die Kupplungsverzahnung liegt nach dem Kalibrieren einbaufertig vor. /Drey00/

Festigkeit präzisionsgeschmiedeter Zahnräder

Mages und *Lindner* /Mage79, Lind83/ haben einen Vergleich zur Zahnfußtragfähigkeit umformtechnisch hergestellter Verzahnungen mit spanend gefertigten Verzahnungen durchgeführt. Bei geschmiedeten Kegelrädern konnte eine um 25% höhere Zahnfußtragfähigkeit festgestellt werden.

Walton und *Dean* untersuchten auf Pulsatorprüfständen die Lebensdauer von Zahnrädern. Bei einer Anzahl von 10^7 Lastwechseln ertrugen präzisionsgeschmiedete Zahnräder eine um 7,5% höhere Last gegenüber gespantem und damit eine höhere Lebensdauer /Walt97/.

Auch das Auftreten von Flankenschäden an Zahnrädern (Grübchenbildung) tritt durch eine schmiedetechnische Herstellung seltener auf als bei spanender Herstellung. Es wurde festgestellt, dass gespante Verzahnungen gegenüber schmiedetechnisch gefertigten 38,5% mehr Schadensstellen aufwiesen /Lehn83/.

2.4 Anforderungsprofil für Zahnräder von Pkw-Getrieben

Nach VDI-Richtlinie 2127 /VDI2127/ sind Getriebe Einrichtungen zum Wandeln oder Übertragen von Bewegungen und in diesem Zusammenhang auch von Energien.

Fahrzeuggetriebe haben die Aufgabe unterschiedliche Fahrbedingungen zwischen Motor und Rädern anzupassen. Sie haben inzwischen einen sehr hohen Entwicklungsstand erreicht und es werden an sie sehr hohe Anforderungen hinsichtlich Baugröße, Gewicht, Belastbarkeit und Geräuschentwicklung gestellt.

Durch die Einführung einer neuen Fertigungstechnologie darf der bestehende hohe Standard der Getriebe nicht gesenkt werden /Bart89/.

Das Handschaltgetriebe mit mechanischer Getriebe- und Kupplungsbetätigung stellt das klassische System für Pkw dar (Bild 2.19). Aktuell hat es in Europa einen hohen Marktanteil von ca. 86%. /Hage01/

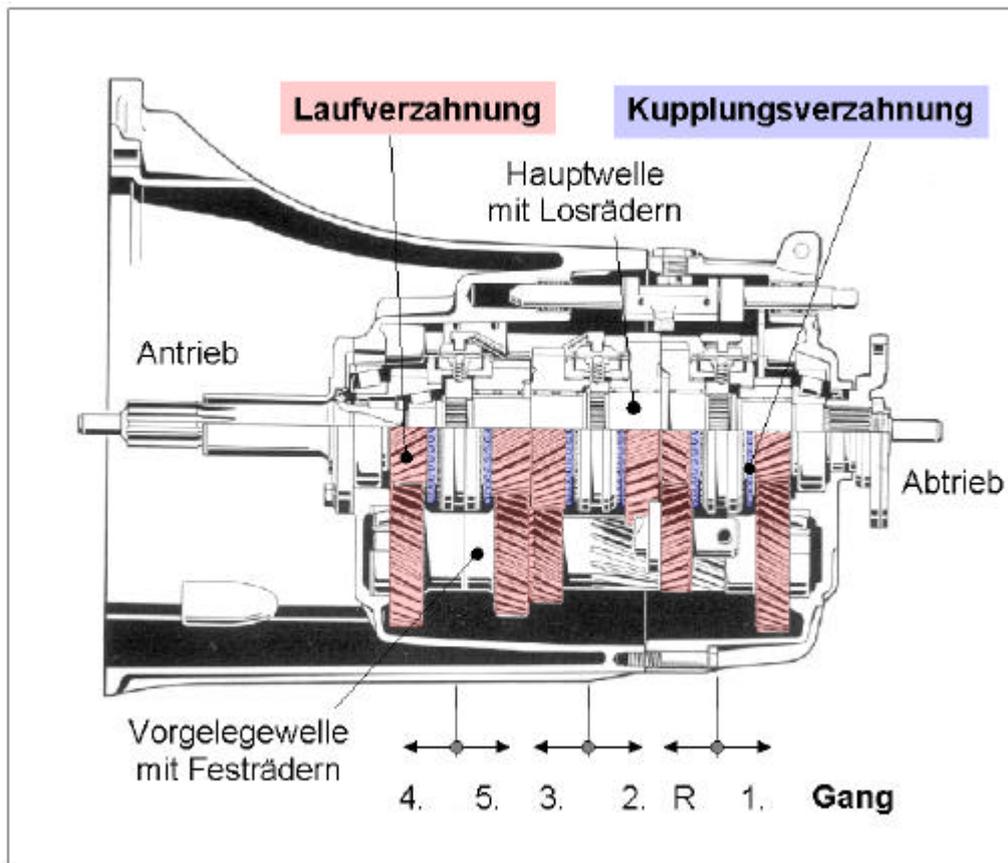


Bild 2.19: Pkw-Fünfgang-Handschaltgetriebe der Firma ZF S5-16 /Loom96/

Grundsätzlich gilt, dass die Auslegung moderner Pkw-Handschalt- und Automatikgetriebe nach heutigem Standard zwingend den Einsatz von Schrägverzahnungen erfordert. /Bart93/ Schrägverzahnte Getriebegangräder zeichnen sich gegenüber geradverzahnten aufgrund des größeren Überdeckungsgrades durch geringere Geräuschemission und eine gleichförmigere Kraftübertragung aus. Je nach Funktion des Getriebes kommen unterschiedliche Rädertypen mit charakteristischen Radkörpergeometrien zum Einsatz. In Schaltgetrieben sind dies Festräder, Rücklaufräder sowie Losräder mit Kupplungsverzahnung als Bindeglied zur Schaltungseinheit (Bild 2.19). Der größte Teil der heutigen Pkw-Schaltgetriebe hat fünf Gänge. /VDA99/

Ein 5-Gang Schaltgetriebe wird aus 14 schrägverzahnten Zahnrädern aufgebaut, wobei die 6 Losräder zusätzlich eine Kupplungsverzahnung besitzen. In Automatikgetrieben werden Zahnräder für das Planetengetriebe (Sonnenräder, Planetenräder) und zur Ankoppelung des Achsantriebs verwendet. /Bart89/

Bild 2.20 zeigt den konventionellen Aufbau einer Synchronisationseinrichtung für ein Pkw-Handschaltgetriebe bestehend aus Zahnrad, Kupplungskörper, Synchronring, Synchronkörper und Schiebemuffe.

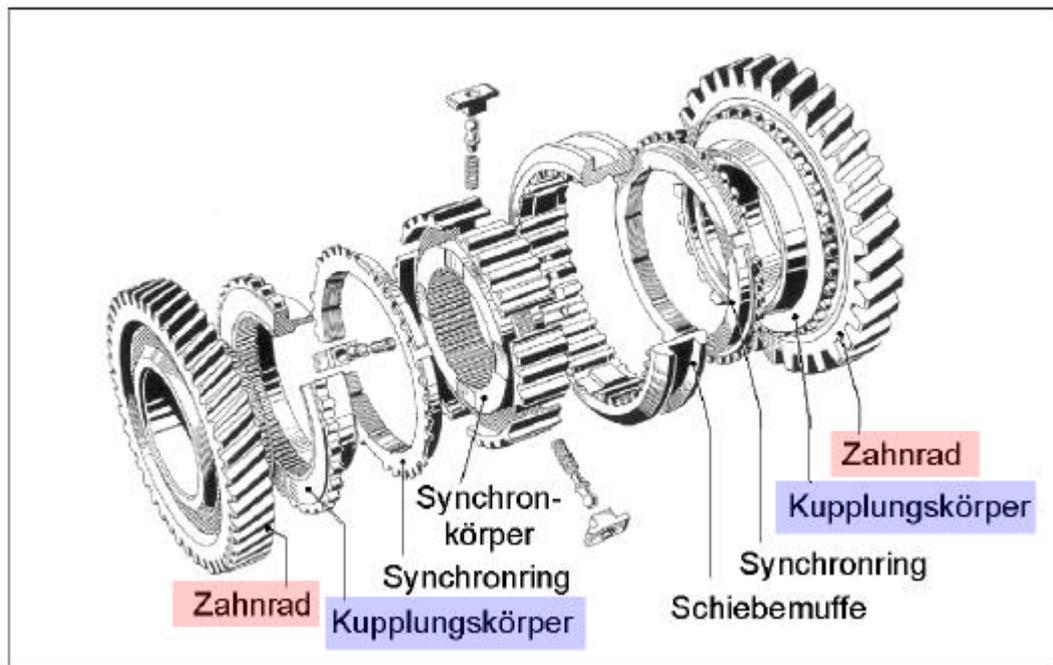


Bild 2.20: Aufbau einer Synchronisierung eines Pkw-Handschaltgetriebes /Loom96/

In [Bild 2.21](#) sind die wichtigsten Anforderungen an die Vorverzahnung und die Fertigungstechnologie aus Sicht der Anwender dargestellt. Zusätzlich sind typische Verzahnungsdaten für Getrieberäder in Nutzkraftfahrzeugen sowie in Personenkraftwagen sowohl mit Handschalt- als auch mit automatischem Getriebe angegeben. Bei diesen Zahnrädern wird bei konventionell spanender Herstellung nach der Herstellung der Vorverzahnung eine Wärmebehandlung mit nachfolgender Hartfeinbearbeitung durchgeführt.

Die Vorverzahnungsqualität für Nkw- und Pkw-Getriebe soll etwa IT 8-9 betragen. Die Werte des Schleifaufmaßes auf den Zähnen sollen zwischen 0,07 – 0,15 mm pro Flanke betragen. Die Aufmaße für die Hartbearbeitung sollen möglichst gering sein um die Effizienz der Prozesskette zu steigern und um bei der Hartbearbeitung zum Erreichen der geforderten Genauigkeit nicht zu viel Material abtragen zu müssen, so dass die gehärtete Schicht u.U. wieder ganz oder teilweise entfernt wird. Das Schleifaufmaß soll möglichst gleichmäßig auf der Flanke vorliegen, andernfalls kann es bei der Hartfeinbearbeitung zu hohem Verschleiß oder Beschädigung der Schleifscheibe kommen. Das Aufmaß in der Bohrung des Zahnrades soll nicht größer als 0,2 - 0,3 mm bezogen auf den Durchmesser sein. Der Rundlauffehler der Verzahnung zur Bohrung soll möglichst im Bereich von 0,025 – 0,5 mm bleiben.

Hinsichtlich der Zahngeometrie werden zur Geräuschoptimierung Hochverzahnungen eingesetzt. /Felt99/

Geometrie / Qualität				Fertigungstechnologie
	Nkw	Pkw	Pkw (Autom.)	
Normalmodul m	3 - 5	1,5 - 3,5	1 - 2,5	● Integration möglichst vieler Bearbeitungsstufen
Normalein- griffswinkel α_n	20-30°	15-20°	20°	● Minimierung des Fertig- bearbeitungsaufwandes
Zähnezahl z	11 - 60	16 - 60	17 - 60	
Schrägungs- winkel β	< 30°	<35°	<20°	● reproduzierbares Härte- verzugsverhalten
Vorverzahnungsqualität:	IT 8 - 9			
max. Flankenmaß:	0,07 - 0,15 mm			● Aufnahmemöglichkeiten für die Radkörperfertig- bearbeitung
max. Aufmaß:	0,2 - 0,3 mm			
Rundlauffehler F_r :	0,025 - 0,5 mm			
Verzahnungsqualität nach der Feinbearbeitung:	IT 6 - 7			● hohe Prozesssicherheit und Flexibilität
Breitenballigkeit:	ca. 0,005 - 0,01 mm			
Höhenballigkeit:	ca. 0,01 - 0,015 mm			
Kopfkantenbruch Anfasen der Stirnkanten				

Bild 2.21: Anforderungen an die Herstellung von Verzahnungen aus der Sicht der Anwender bezüglich Geometrie / Qualität und Fertigungstechnologie /Felt99/

Die Technologie des Fertigungsverfahrens betreffend sollten möglichst viele Stufen in einem Bearbeitungsgang enthalten sein. Der Fertigbearbeitungsaufwand der Zahnräder ist durch ein möglichst geringes Aufmaß gering zu halten. Des Weiteren sollten Prozesse zur Zahnradherstellung eine hohe Prozesssicherheit sowie eine hohe Änderungsflexibilität aufweisen.

Maßnahmen zur Gewichtsreduzierung von Zahnrädern gewinnen im Hinblick auf Leichtbaumaßnahmen im Automobilbau zunehmend an Bedeutung. Für die Auslegung der Laufverzahnung im Getriebe maßgebend sind neben dem übersetzungsbedingten Durchmesser für das übertragbare Antriebsmoment in der Regel die Breite der Verzahnung.

Der Innendurchmesser wird durch den Durchmesser der Lagerung auf der Welle bestimmt. Die Breite der Schaltradragerung sowie die mit dem Zahnrad verbundene Kupplungsverzahnung bestimmen die Breite der Nabe der Schalträder. In der Regel ist der Stegbereich zwischen Nabe und Verzahnung bei massiven Zahnrädern für das zu übertragende Moment überdimensioniert. In diesem Bereich kann durch das Einbringen von Vertiefungen Gewicht eingespart werden. /Barn97/

Bei diesem Leichtbauaspekt spielt die umformtechnische Herstellung von Zahnrädern eine wichtige Rolle, da in der Regel ohne zusätzliche Fertigungsschritte Taschen in den Stirnseiten der Zahnräder eingefügt werden können. So lassen sich umformtech-

nisch Zahnradgrundkörpergeometrien erzeugen, die spanend nur mit großem Aufwand hergestellt werden können.

3 Entwicklungsbedarf

Wie in den vorangegangenen Kapiteln erläutert, existieren eine Vielzahl von Verfahren für eine umformtechnische Zahnradherstellung. Zur Zeit hat sich jedoch noch kein Verfahren gegenüber der konventionellen spanenden Fertigung für das Produktspektrum schrägverzahnter Räder durchsetzen können. Es besteht noch erheblicher Forschungsbedarf, damit umformende Verfahren gegenüber der konventionellen Zahnradherstellung konkurrenzfähig sind. Dieses gilt sowohl für die Auslegung der Bauteile, Konzeption und Konstruktion der Werkzeugsysteme, die Prozessführung als auch für die nachfolgenden Operationen wie Wärmebehandlung und Hartfeinbearbeitung.

Entscheidend für die industrielle Einführung alternativer Fertigungstechnologien sind Potentiale zur Senkung der Fertigungskosten. Das Präzisionsschmieden trägt durch die Verkürzung der Prozesskette mittels Substitution der Weichbearbeitung und damit dem erheblich geringeren Aufwand des Spanens sowie der besseren Materialausnutzung einen wesentlichen Anteil dazu bei. Filigrane, verzahnte Schmiedegesenke und der Einsatz höherwertiger Rohteile (z.B. gesägte Rohrabschnitte) lassen jedoch die Kosten für eine umformende Herstellung steigen.

In Pkw-Getrieben werden hauptsächlich Hochverzahnungen zur Minderung der Geräuschemission eingesetzt, die für eine spanende Fertigung konzipiert sind. Die Auslegung orientiert sich vorrangig an funktionalen Gesichtspunkten der Zerspanverfahren (z.B. Auslaufzonen), um eine einfache Herstellbarkeit zu gewährleisten. Das Verfahren des Präzisionsschmiedens hat an die Auslegung von Zahngeometrie und Zahnradgrundkörper eigene Anforderungen, um ökonomisch fertigen und die verfahrenseigenen Vorteile nutzen zu können. Insbesondere der Matrizenverschleiß kann durch eine nach umformtechnischen Gesichtspunkten optimierte Verzahnungsgeometrie (z.B. Verringerung der Zahnhöhe) gesenkt werden. Dadurch kann zudem der thermische Verzug der Zahnräder sowie die thermische Belastung der Gesenke reduziert werden.

In Abhängigkeit von Ausgangsmaterial und Bauteilgeometrie kommen ein- oder mehrstufige Prozesse in Frage. Entscheidend für die erfolgreiche präzisionsschmiedetechnische Herstellung von Zahnrädern ist die Abstimmung von Werkzeugsystem und gegebenenfalls der Stadienfolge auf Bauteil und Werkstückwerkstoff. Hinterschneidungen sind mit umformtechnischen Verfahren stets problematisch herstellbar. Hier werden Verfahrenskombinationen angewendet, die einen erhöhten Aufwand bedeuten. So werden heute angeschmiedete Kupplungsverzahnungen durch Präzisionsschmieden und einen nachfolgenden Kalibrierschritt der Kupplungsverzahnung (Bild 2.16) gefertigt.

Um die spanende Herstellung von Vorverzahnungen durch eine umformtechnische Herstellung ersetzen und somit industriell das Potential des Verfahrens Präzisionsschmieden ausschöpfen zu können, müssen die Bauteile im Hinblick auf die Anforderungen des Prozesses ausgelegt und geeignete Werkzeugsysteme entwickelt werden.

4 Zielsetzung

In der Herstellung von Zahnrädern für Pkw-Getriebe durch Präzisionsschmieden liegt ein erhebliches wirtschaftliches und technologisches Potential. Um dieses nutzen zu können, gilt es insbesondere die Auslegung der Bauteile, der Stadienfolge, des Werkzeugsystems und der Prozessführung genau aufeinander abzustimmen. Hinsichtlich des Werkzeugsystems stellt die Formung von Gangrädern mit hinterschnittener Kuppelungsverzahnung eine besondere Herausforderung dar. Es ergeben sich folgende Arbeitsschwerpunkte und Teilziele:

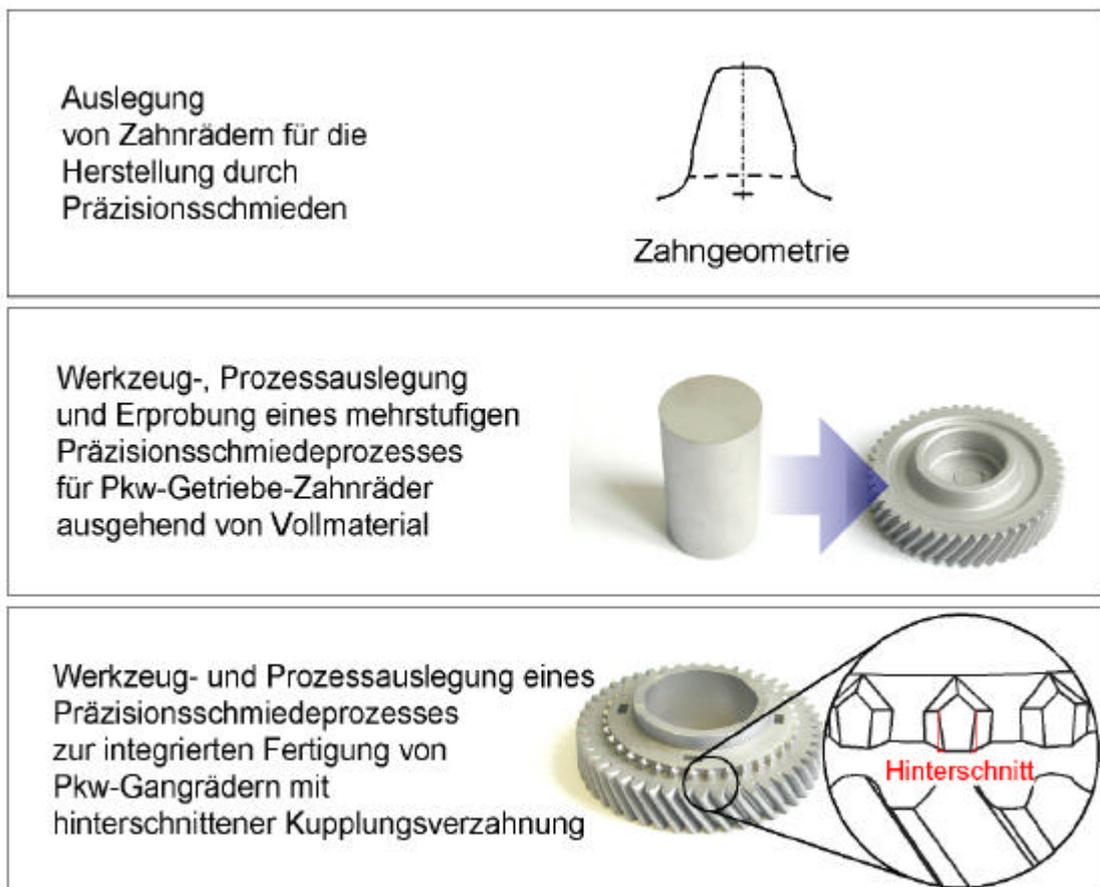


Bild 4.1: Zielsetzung der Arbeit

- ◆ *Konstruktive Auslegung von Zahnrädern für die Herstellung durch Präzisionsschmieden*

Die Geometrie der Verzahnung hat erheblichen Einfluss auf den Umformprozess und den Ausstoßvorgang beim Präzisionsschmieden. Filigrane, schlanke Verzahnungen, wie sie bei Pkw-Getrieben heute zum Einsatz kommen, sind umformtechnisch herstellbar, führen aber zu hohen Gesenkinnendrücken und hoher thermischer und tribologischer Belastung der Gesenke. Um die genannten Nachteile zu vermeiden, ist es sinnvoll, eine umformtechnisch optimierte Verzahnung herzustellen. Ausgehend von einer typischen Kfz-Verzahnung als Referenz wird (in Zusammenarbeit mit der Forschungsstelle für Zahnräder und Getriebbau, TU München, Prof. B.-R. Höhn /Höhn97/) eine für die umformtechnische Herstellung optimierte Verzahnung ausgelegt. Die umform-

technisch optimierte Verzahnung soll das Referenzzahnrad ersetzen und qualitativ ähnliche Werte bezüglich Laufruhe und Tragfähigkeit aufweisen.

◆ *Werkzeug- und Prozessauslegung eines mehrstufigen Präzisionsschmiedeprozesses für Pkw-Getriebezahnräder ausgehend von Vollmaterial*

Für das Präzisionsschmieden von schrägverzahnten Stirnräder müssen geeignete Werkzeugkonzepte entwickelt werden, die hohe Standmengen ermöglichen und eine gleichbleibende Qualität der Bauteile über der Einsatzdauer im Betrieb garantieren. Da sich Werkzeuge für das Präzisionsschmieden von Zahnrädern dem Aufbau nach deutlich von einfachen Gesenkschmiedewerkzeugen unterscheiden, sollen spezifische Anforderungen definiert und der prinzipielle Aufbau solcher Werkzeuge dargestellt werden. Bei der Konzeption und Konstruktion der Werkzeuge müssen auch die existierenden technologischen Gegebenheiten in den Schmiedebetrieben berücksichtigt werden. Wichtige Randbedingung sind Bauart und Größe der Umformpressen. Auch für kleine Umformpressen sind Werkzeugkonstruktionen zu entwickeln, die einen mehrstufigen Umformprozess bei relativ kleinem Einbauraum ermöglichen. Zur mehrstufigen Fertigung eines Zahnrades auf Pressen mit kleinem Einbauraum soll ein Werkzeugsystem entwickelt werden. Mehrstufige Präzisionsschmiedeprozesse haben den Vorteil, dass gegenüber einstufigen Prozessen Vollmaterial als Halbzeug eingesetzt werden kann. Um den Verschleiß und die spezifische Belastung in den einzelnen Stufen gering zu halten, kann die Umformung auf mehrere Stufen aufgeteilt werden. Die Stadienfolge soll mit Methoden der FEM ausgelegt werden. Experimentelle Untersuchungen sollen nach erfolgtem Werkzeugbau helfen, die entscheidenden Prozessparameter und deren Einfluss auf den Umformvorgang und die Bauteilqualität zu bestimmen.

◆ *Werkzeug- und Prozessauslegung eines Präzisionsschmiedeprozesses zur integrierten Fertigung von Pkw-Gangrädern mit hinterschnittener Kupplungsverzahnung*

Der wirtschaftliche Vorteil der schmiedetechnischen Fertigung ist umso höher, je mehr Fertigungsschritte der konventionellen Prozesskette in den Umformungsprozess zusammengefasst werden können. Gangräder mit hinterschnittener Kupplungsverzahnung weisen eine Vielzahl von Formelementen auf. Ziel muss es daher sein, die gesamte bisher erforderliche (spanende) Weichbearbeitung der Lauf- und Kupplungsverzahnung, sowie die Formung des Radkörpers in den Umformprozess zu integrieren. Hierfür soll ein geeignetes Werkzeugsystem zur Fertigung von n Pkw-Gangrädern mit hinterschnittener Kupplungsverzahnung konzipiert werden. Bei der Entwicklung eines Präzisionsschmiedeteils, welches in Großserien hergestellt wird, müssen sowohl der Umformprozess als auch alle nachfolgenden Bearbeitungsschritte berücksichtigt und aufeinander abgestimmt werden. Dies betrifft insbesondere das Werkzeugsystem zum Präzisionsschmieden, die Auslegung des Schmiedeteils, die Festlegung der Aufmaße und die Hartfeinbearbeitung. Es ist anzustreben, mit Betrachtung der gesamten Prozesskette, ein Umformteil in möglichst hoher Qualität bei gleichzeitig günstigen Kos-

ten zu produzieren. Die mit dem Werkzeugsystem erreichbaren Bauteilqualitäten und die Einflüsse der Eingangsgrößen auf den Prozess sollen untersucht werden.

5 Auslegung von Verzahnungen für die umformtechnische Herstellung

In diesem Kapitel wird ausgehend von den Grundlagen der Verzahnungsauslegung ein Beispiel für eine für die umformtechnische Herstellung optimierte Verzahnung vorgestellt. Die Auslegung berücksichtigt neben Anregungs-, Schwingungsverhalten und Zahnfußbelastbarkeit vor allem den Einfluss der Verzahnung auf den Herstellungsprozess.

5.1 Konstruktive Gesichtspunkte

Die in Hinblick auf die spanende Fertigung entwickelten Hochverzahnungen von Getrieberädern sind durch Präzisionsschmieden prinzipiell herstellbar. Jedoch kann die Wirtschaftlichkeit eines umformtechnischen Fertigungsverfahrens durch eine schmiedegerechte Auslegung der Geometrie deutlich gesteigert werden.

Beim Schmieden von hochverzahnten Bauteilen kommt es bei der Ausformung der Verzahnung durch die langen, sich stark verjüngenden Fließwege gegenüber „stumpfen“ Verzahnungen zu Standmengeneinbußen der Schmiedematrizen. Diese Standmengeneinbußen, die sich direkt auf die Wirtschaftlichkeit des Fertigungsprozesses auswirken, werden vorwiegend durch thermische und mechanische Schädigung der filigranen Matrizenelemente hervorgerufen. Neben der verminderten mechanischen Festigkeit der Schmiedematrizen infolge dünnerer Verzahnungsquerschnitte kann die eingebrachte Wärme nur unzureichend weitergeleitet werden, so dass es zu einem Wärmestau in den feingliedrigen Matrizenelementen kommt, die die Verzahnung abbilden (Bild 5.1).

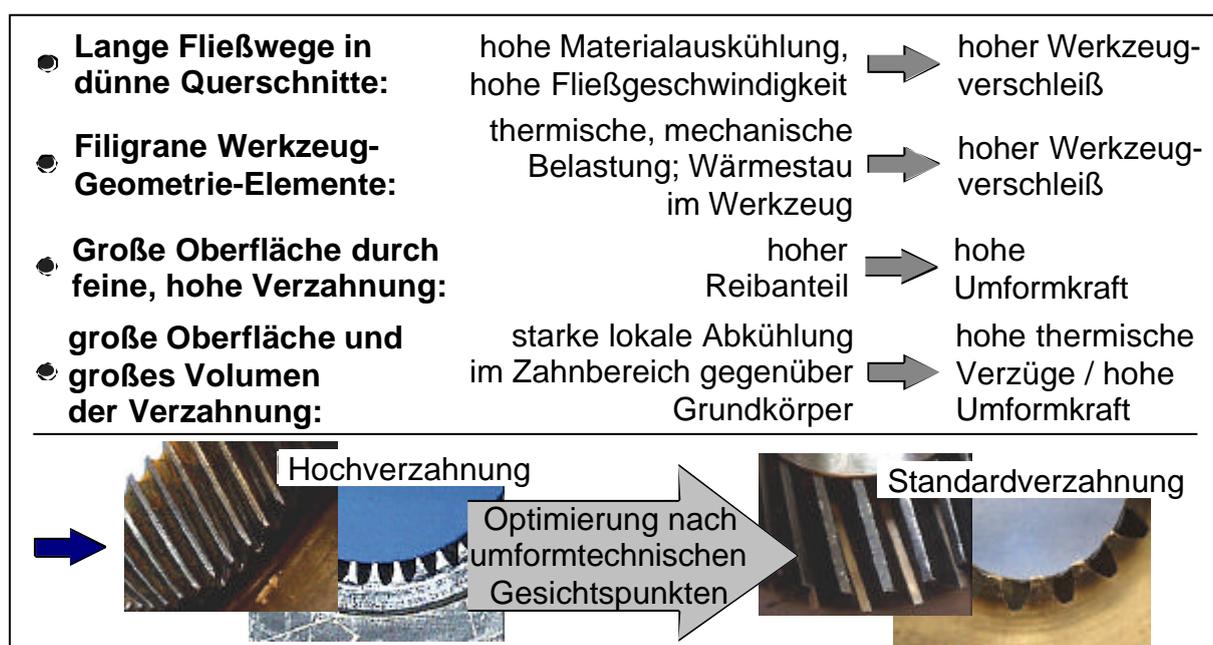


Bild 5.1: Einflüsse der Verzahnung auf den Präzisionsschmiedeprozess

Dies kann zu Anlasseffekten und somit zur Erweichung des Werkzeugwerkstoffs führen /Doeg98/. Bei den folgenden Umformungen kann es zu Verformungen an den Matrizen und somit zur Nichteinhaltung der Toleranzen am Bauteil kommen. Auch die Oberfläche der Verzahnung nimmt Einfluss auf den Umformprozess. Proportional zur Oberfläche nimmt der Wärmeübergang vom Werkstück zum Gesenk zu und somit die Abkühlung des Schmiedeteils pro Zeiteinheit ab. Mit sinkender Temperatur erhöht sich die Fließspannung. Zum anderen wird das Umformverhalten durch eine große Reibkontaktfläche behindert.

Standardverzahnungen mit niedrigen Zahnhöhen und großen Normaleingriffswinkeln können aufgrund der höheren Werkzeugsteifigkeit und vergrößerten Verzahnungsquerschnitte bedeutend wirtschaftlicher gefertigt werden. Durch eine Verzahnungsauslegung, die sich an den Bedürfnissen der Herstellung durch Präzisionsschmieden orientiert, können solche Verzahnungen qualitativ ähnliche Werte für Zahnfußfestigkeit und Laufruhe wie Pkw-Hochverzahnungen erreichen.

Die Geräuschabstrahlung eines Getriebes lässt sich, vereinfacht dargestellt durch die Einflüsse Schwingungsanregung, Übertragungsverhalten der Schwingungen vom Entstehungsort zum abstrahlenden Gehäuse und den Abstrahleigenschaften des Gehäuses beschreiben. Der Einfluss der Schwingungsanregung ist hierbei dominierend und wird ganz wesentlich von der Verzahnungsgeometrie bestimmt. Die Ursachen sind vor allem die während des Abwälvorgangs lokal veränderliche Verzahnungssteifigkeit mit dem Eingriffspunkt sowie Verzahnungsabweichungen und -korrekturen. Als geeignete Größe zur quantitativen Beschreibung der Schwingungsanregung kann der Anregungspegel L_A einer Verzahnung definiert werden /Gerb84/.

Bild 5.2 stellt den Einfluss der Profil- und der Sprungüberdeckung auf den Anregungspegel L_A dar. Die Profilüberdeckung ϵ_α und die Sprungüberdeckung ϵ_β beschreiben, wie viele Zahnpaare im Mittel gleichzeitig im Eingriff stehen. Diese Parameter besitzen somit einen wesentlichen Einfluss auf den zeitlichen Verlauf der Verzahnungssteifigkeit und somit auf das Anregungsverhalten der Verzahnung.

Konventionell werden geräuscharme Verzahnungen mit möglichst hoher Gesamtüberdeckung ϵ_γ ausgelegt. Diese ergibt sich zu:

$$\epsilon_\gamma = \epsilon_\alpha + \epsilon_\beta \quad (5.1)$$

Voraussetzung für eine geräuscharme Verzahnung ist allgemein eine hohe Überdeckung und zusätzlich eine Minimierung des Eingriffsstoßes. Ersteres wird durch einen Übergang zu kleinen Moduln (steigende Profilüberdeckung ϵ_α) und großen Schrägungswinkeln (steigende Sprungüberdeckung ϵ_β) erreicht. Dies führt dazu, dass stets mehrere Zähne im Eingriff sind (große Gesamtüberdeckung ϵ_γ). Dieser Effekt wird noch verstärkt durch hohe, schlanke und damit biegeeweiche Zähne. Der zeitlich veränderliche Verlauf der Verzahnungssteifigkeit wird dadurch weitgehend geglättet. Die Vorteile einer so erzeugbaren hohen Gesamtüberdeckung kommen jedoch nur dann in

vollem Umfang zum Tragen, wenn bei ausreichender Zahnfußtragfähigkeit gleichzeitig eine hohe Verzahnungsgenauigkeit und eine richtig ausgelegte Flankenkorrektur gewährleistet sind. /Baet69, Knab77, Müll91/

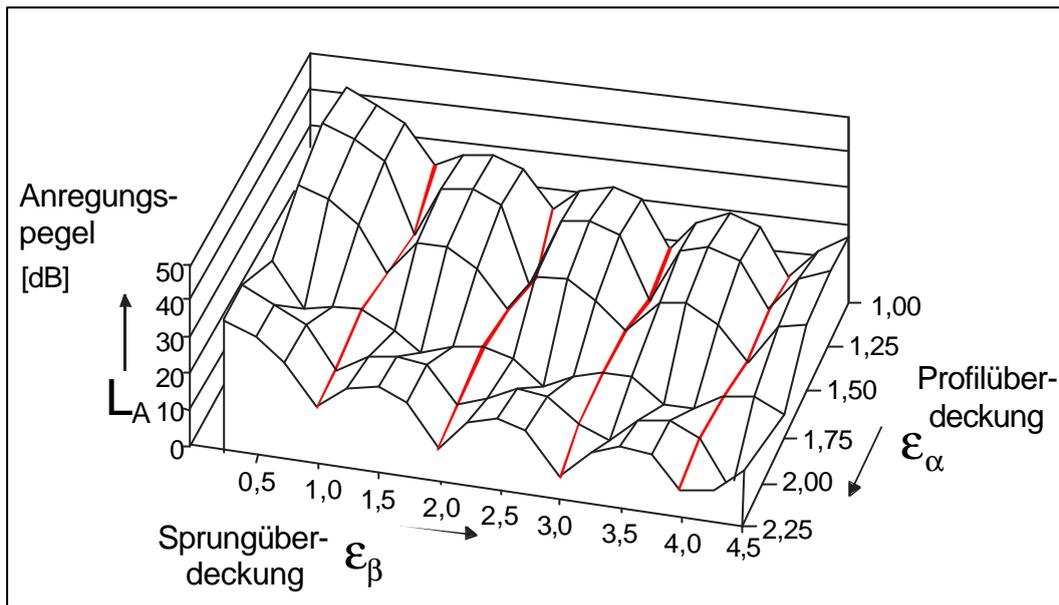


Bild 5.2: Abhängigkeit des Anregungspegels L_A von der Profilüberdeckung ε_α und der Sprungüberdeckung ε_β (Last $F_{bt}/b=600$ N/mm) /Satt97/

Aber auch Verzahnungen mit geringer Profilüberdeckung können bei geeigneter Auslegung ein günstiges Geräuschverhalten bieten.

Ein hoher Wert des Anregungspegels L_A steht entsprechend für eine starke Anregung aus der Verzahnung. Es ist zu erkennen, dass mit zunehmender Überdeckung die Schwingungsanregung kleiner wird. Bild 5.2 zeigt auch, dass bei konstanter Profilüberdeckung deutliche Minima der Anregung bei ganzzahliger Sprungüberdeckung feststellbar sind. Bei einer ganzzahligen Sprungüberdeckung besitzt die Profilüberdeckung nur einen vergleichsweise geringen Einfluss auf den Anregungspegel L_A . Anregungsarme Verzahnungen sind somit auch bei geringer Profilüberdeckung möglich. Ein Ausnahmefall ist $\varepsilon_\alpha \sim 1,75$, wo keine Minima bei ganzzahliger Sprungüberdeckung vorliegen. /Satt97/

Da Schmiedegesenke in erster Linie durch abrasiven Verschleiß ausfallen /Doeg98/, sind lange Fließwege unter hohen Drücken zu vermeiden. Für die schmiedetechnische Herstellung von Laufverzahnungen resultiert hieraus die Forderung, die Verzahnungsgeometrie alternativ auszulegen, ohne jedoch Nachteile bezüglich der Tragfähigkeit und der Geräuschbildung befürchten zu müssen. Eine Substitution der Hochverzahnung durch eine schwingungstechnisch optimierte, umformtechnisch realisierte Verzahnung kann bei gleichwertiger Geräuschbelastung zu einem Tragfähigkeitsgewinn aufgrund der bauteilspezifischen Eigenschaften von Schmiedeteilen führen /Höhn97/.

5.2 Auslegung einer umformtechnischen Verzahnung

Um die negativen Einflüsse, die eine Hochverzahnung für den umformtechnischen Prozess mit sich bringt, auszuschließen, ist in Zusammenarbeit mit der Forschungsstelle für Zahnräder und Getriebbau der Universität München (FZG) eine für die umformtechnische Herstellung optimierte Zahngeometrie ausgelegt worden. In erster Linie führen im Umformprozess der vergrößerte Eingriffswinkel und die geringere Zahnhöhe zu verkürzten und optimierten Fließwegen und damit zu einer erheblich verringerten Belastung an den formgebenden Gravurelementen (vgl. Bild 5.1).

Als Referenzverzahnung wurde eine typische spanend hergestellte Pkw-Getriebe-Verzahnung mit günstigem Anregungsverhalten ausgewählt. Tabelle 5.1 zeigt die Geometriedaten dieser Verzahnung.

Tabelle 5.1: Geometriedaten der konventionellen Hochverzahnung als Referenzverzahnung für ein Pkw-Handschaltgetriebe, fünfter Gang /Doni03/

konventionelle Hochverzahnung als Referenzverzahnung (RV)			
	Formelzeichen	Einheit	Wert
Übersetzung	$i = z_2/z_1$	-	43 /33
Achsabstand	a	mm	75
Schrägungswinkel	β	°	33
Normalmodul	m	mm	1,67
Normaleingriffswinkel	α	°	16
Profilüberdeckung	ε_α	-	1,69
Sprungüberdeckung	ε_β	-	1,80
Verzahnungsbreite	b	mm	17,3

Als umformtechnisch optimierte Variante wurde eine Verzahnung für den identischen Einsatzfall so ausgelegt, dass die umformtechnische Fertigung vereinfacht wird. Hierzu wurde der Normaleingriffswinkel der Verzahnung von 16° auf 24° erhöht. Achsabstand, Schrägungswinkel und Verzahnungsbreite wurden nicht verändert (Tabelle 5.2).

Tabelle 5.2: Geometriedaten der nach umformtechnischen Gesichtspunkten optimierten Verzahnung ausgehend von der Referenzverzahnung /Doni03/

umformtechnisch optimierte Verzahnung (UV) zur Referenz Tab. 5.1			
	Formelzeichen	Einheit	Wert
Übersetzung	$i = z_2/z_1$	-	48/37
Achsabstand	a	mm	75
Schrägungswinkel	β	°	33
Normalmodul	m	mm	1,5
Normaleingriffswinkel	α	°	24
Profilüberdeckung	ε_α	-	1,26
Sprungüberdeckung	ε_β	-	2,00
Verzahnungsbreite	b	mm	17,3

Die Hauptgeometriedaten der Verzahnung werden so gewählt, dass Profilüberdeckung ε_α und Sprungüberdeckung ε_β gemäß zuvor erläuterten Zusammenhänge für einen geräuscharmen Lauf im optimalen Bereich liegen.

Neben der Laufruhe stellt die Tragfähigkeit ein weiteres wichtiges Funktionskriterium dar, das von einer Verzahnung erfüllt werden muss. In einer mit Last beaufschlagten Verzahnung wirken die Zahnkräfte senkrecht auf die Zahnflanken. Neben der Belastung der Flanke resultiert daraus auch eine Biegebeanspruchung des einzelnen Zahnes.

Hier wird die Tragfähigkeitsberechnung nach DIN vorgestellt. Sie ist die gängigste Berechnungsmethode neben anderen, wie z.B. der FEM.

Nach DIN 3990 wird die Zahnfußnennspannung σ_{F0} aus der Biegenennspannung $\sigma_{b,Nenn}$ und dem Spannungskorrekturfaktor Y_S , der die Kerbwirkung der Fußausrundung berücksichtigt, berechnet.

$$s_{F0} = s_{b,nenn} \cdot Y_S \quad (5.2)$$

Bei Geradverzahnungen mit einer Profilüberdeckung $e_a < 2$ (Standardverzahnung) wird bei der Berechnung des wirksamen Biegemomentes die am äußeren Einzeleingriffspunkt wirkende Normalkraft F_n mit dem Hebelarm vom Angriffspunkt der Kraft an der Zahnmittellinie bis zum kritischen Zahnfußquerschnitt (Berührungspunkt 30°-Tangente an die Fußausrundung) h_F eingesetzt (Bild 5.3).

$$s_{F0} = \frac{M_b}{W_b} = \frac{F_n \cdot \cos \alpha_{Fn} \cdot h_F}{b \cdot s_{Fn}^2 / 6} \quad (5.3)$$

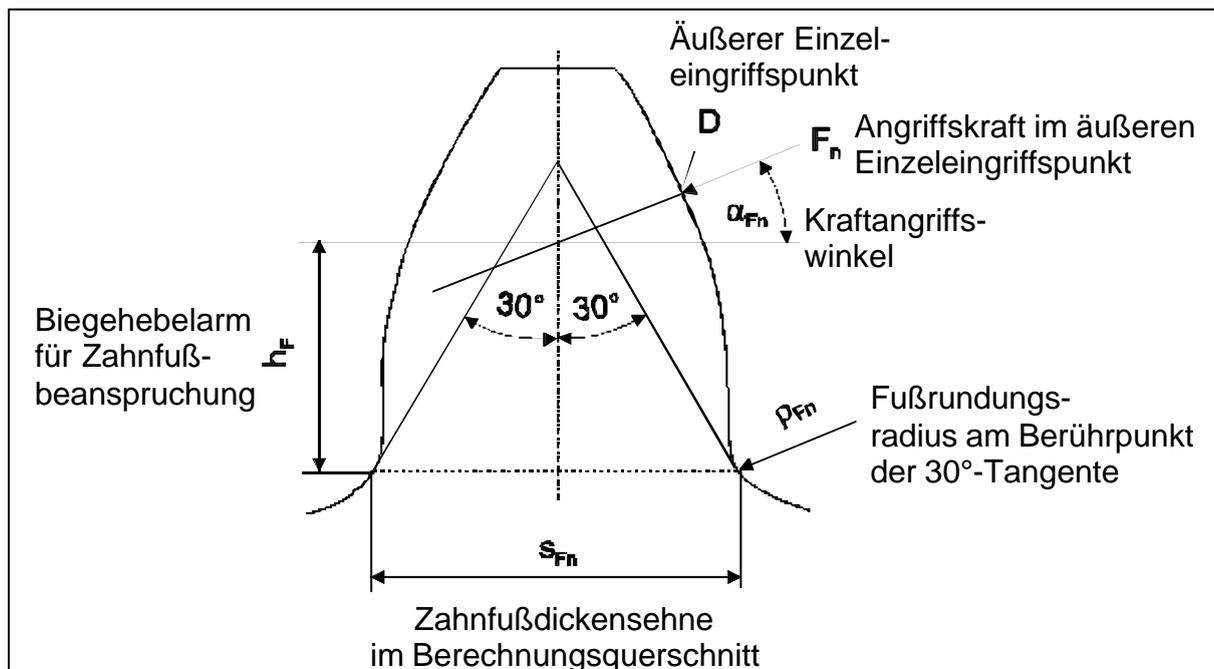


Bild 5.3: Berechnung der Zahnfußspannung nach DIN 3990

Schrägverzahnungen werden für die Berechnung der Zahnfußspannung nach DIN in eine Ersatz-Geradverzahnung überführt. Der Einfluss äußerer Drehmomentschwan-

kungen, der inneren Getriebedynamik sowie ungleichmäßiger Lastverteilung aufgrund von Abweichungen bei der Herstellung und elastischer Verformung der Getriebeelemente (Wellen, Lager, Zähne, ...) auf die auftretenden Zahnfußspannungen wird durch die Lastfaktoren (K_a , K_v , $K_{f\alpha}$, $K_{f\beta}$) berücksichtigt. Nach DIN 3990 ergibt sich damit die Zahnfußspannung σ_F der allgemeinen abweichungsbehafteten Verzahnung zu

$$s_F = s_{F0} \cdot K_A \cdot K_V \cdot K_{Fa} \cdot K_{Fb} \quad (5.4)$$

Der Vergleich beider Verzahnungen in Bezug auf die Tragfähigkeitswerte zeigt, dass die umformtechnisch optimierte Variante ähnliche Fuß- und Tragfähigkeitswerte wie die Referenzverzahnung aufweist. Tabelle 5.3 zeigt die berechneten Zahnfußspannungen für beide Verzahnungen für ein Drehmoment $T_2 = 490 \text{ Nm}$ und eine Drehzahl von $n = 3000 \text{ min}^{-1}$ am Rad.

Tabelle 5.3: Vergleich der Zahnfußspannungen für die Referenzverzahnung (RV) und die umformtechnisch optimierte Verzahnung (UV) für ein Drehmoment $T_2 = 490 \text{ Nm}$ und eine Drehzahl von $n = 3000 \text{ min}^{-1}$ am Rad (Berechnung nach DIN 3990) /Doni03/

Verzahnung	Zahnfußspannung $s_F \text{ [N/mm}^2\text{]}$		Zahnfußspannung Nennwert $s_{F0} \text{ [N/mm}^2\text{]}$	
	Ritzel	Rad	Ritzel	Rad
RV	962,6	916,1	860,0	818,4
UV	975,3	969,1	848,0	842,6

Breitenfaktor $K_{H\beta}$ und Stirnfaktor $K_{H\alpha}$ werden nach DIN 3990 nach Verfahren B berechnet.

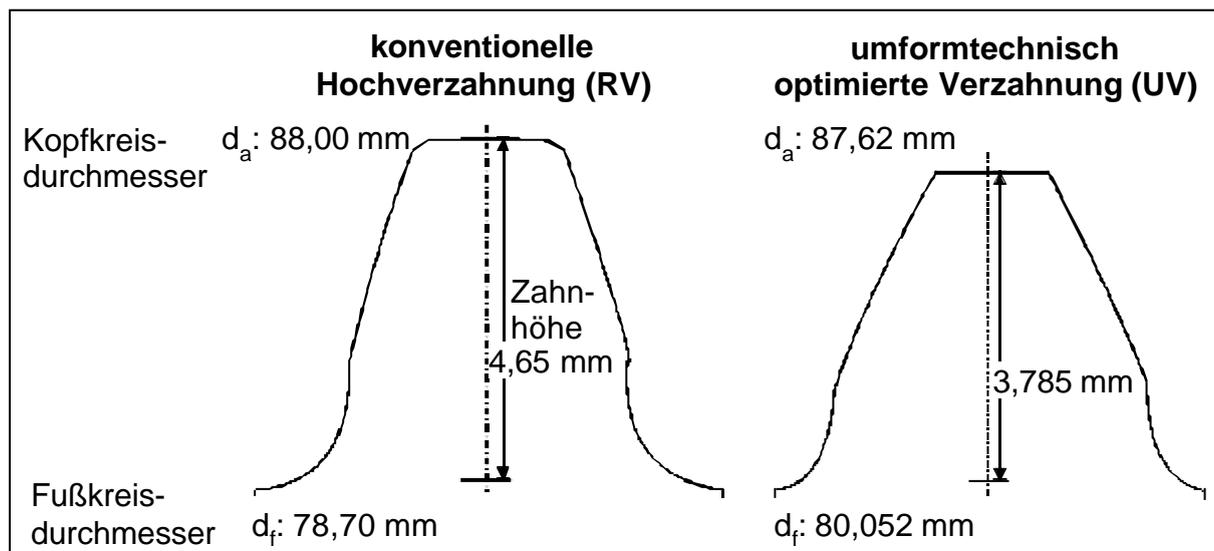


Bild 5.4: Zähne des Rades der Pkw-Hochverzahnung (RV) und der umformtechnisch optimierten Verzahnung (UV) für den gleichen Einsatzfall abgebildet im Stirnschnitt

Für die umformtechnische Herstellung von Verzahnungen werden Zahnprofile, die einen möglichst geringen Umformgrad erfordern und durch die Profilform den Werkstofffluss erleichtern, bevorzugt. Diese Forderung wird durch die umformtechnisch optimierte Variante mit einer geringen Zahnhöhe und einem möglichst stumpfen Zahn erfüllt (Bild 5.4).

Die Werte von Oberfläche und Volumen der Verzahnung sind wie oben erläutert ebenfalls Größen, die Einfluss auf den Umformprozess nehmen. Die Reibung ist eine Wechselwirkung zwischen sich berührenden Stoffbereichen von Körpern, sie wirkt einer Relativbewegung entgegen (DIN 50323). Sie ist abhängig von der Geometrie der Oberfläche, der Flächenpressung, der Relativgeschwindigkeit, der Temperatur, der Werkstoffpaarung etc.. /Kopp98/ Mit abnehmender Reibung sinkt die benötigte Umformkraft und der Verschleiß an den Schmiedegesenken.

Die für die umformtechnische Herstellung optimierte Verzahnung besitzt eine um 7,1% reduzierte radiale Oberfläche der Verzahnung gegenüber der Referenzverzahnung (Bild 5.5). Die Oberfläche der Verzahnung hat des Weiteren Einfluss auf die abgegebene Wärmemenge in das Gesenk. Diese steigt mit zunehmender Oberfläche an. Auch die Kraft, die zum Entformen des Zahnrades notwendig ist, wird von der radialen Oberfläche der Verzahnung, welche beim Ausstoßen Kontakt mit der verzahnten Matrize hat, bestimmt.

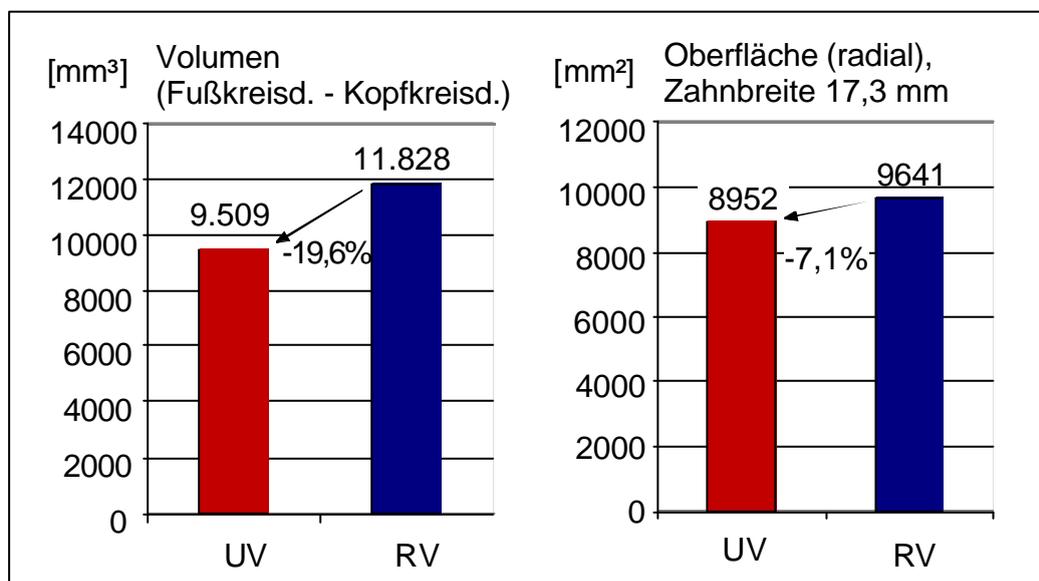


Bild 5.5: Vergleich der Oberflächen und Volumina der Referenzverzahnung (RV) und der umformtechnischen Verzahnung (UV) des Rades, (vgl. Bild 5.4)

Das Volumen der Verzahnung vom Fuß- zum Kopfkreis ist bei der umformtechnisch optimierten Verzahnung um 19,6% geringer, so dass weniger Material zum Füllen der Verzahnung in die Gravur fließen muss. Dies führt zu geringeren Umformkräften im Schmiedeprozess.

5.2.1 Auslegung der Vorverzahnung

An die Auslegung der Vorverzahnung muss die Forderung nach einem auf die Weiterbearbeitung abgestimmten Aufmaß gestellt werden. Um eine möglichst hohe Zahnfußfestigkeit zu erreichen, sollte der Faserverlauf im Zahnfuß nicht unterbrochen werden. Dort wird das Zahnrad nach dem Umformprozess und der Wärmebehandlung nicht weiterbearbeitet (Bild 5.6). Das Werkzeug ist konstruktiv so auszulegen, dass im Fußbereich des Zahnrades keine Nachbearbeitung stattfinden muss.

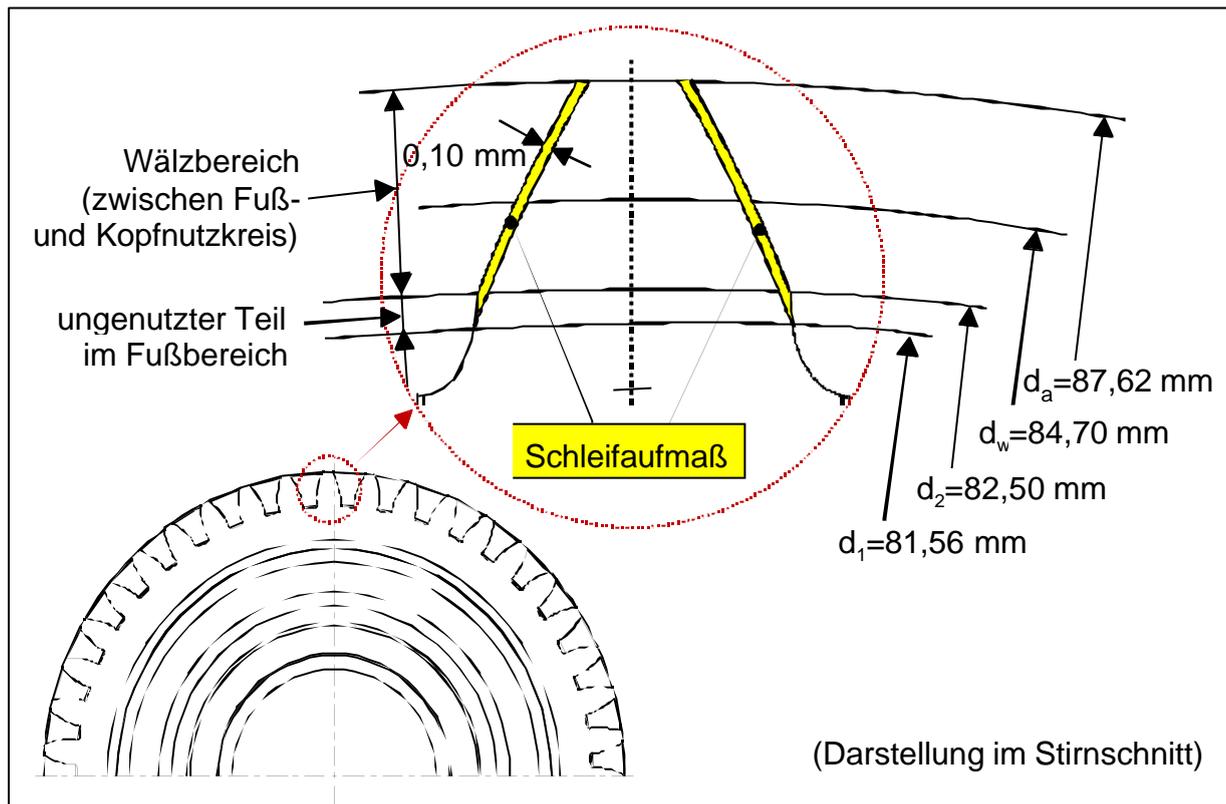


Bild 5.6: Geometrie des Schleifaufmaßes auf der Zahnflanke beim Rad mit umformtechnisch optimierter Verzahnung (UV)

Das Zahnrad wird im Wälzbereich zwischen Fuß- und Kopfnutzkreis geschliffen. Das Aufmaß beträgt dort 0,1 mm. Im ungenutzten Bereich des Zahnkopfes, d.h. dort, wo kein Kontakt mit dem Gegenrad stattfindet, wird das Schleifaufmaß von 0,1 mm auf 0 mm verringert. Im Fußbereich findet zur Erhöhung der Zahnfußfestigkeit kein Schleifen statt. Hier wird dementsprechend kein Aufmaß vorgesehen.

Aufgrund dieser Aufmaßgestaltung muss ein wesentlich geringeres Spanvolumen pro Zahnrad gegenüber einem zusätzlich mit Bearbeitungsaufmaß belegten Fußbereich abgetragen werden. Dadurch wird die Wirtschaftlichkeit der Prozesskette Präzisions-schmieden und Hartfeinbearbeitung nach der Wärmebehandlung deutlich erhöht.

6 Präzisionsschmieden von Pkw-Gangrädern ausgehend von Vollmaterial

Gegenstand dieses Kapitels ist die Entwicklung und Erprobung eines Werkzeugprinzips zur Herstellung von schrägverzahnten Stirnrädern durch Präzisionsschmieden ausgehend von Vollmaterial. Hierfür ist ein mehrstufiger Umformprozess notwendig. Zur Auslegung der Stadienfolge wird die Methode der Finiten Elemente angewendet.

6.1 Auslegung des Schmiedeteils

Für den wirtschaftlichen Erfolg eines geschmiedeten Produktes mit entscheidend ist die Auslegung des Schmiedeteiles unter Berücksichtigung der besonderen Anforderungen eines Präzisionsschmiedeprozesses.

Das Bauteil, für das der folgende Prozess ausgelegt wird, ist das Rad der Getrieberadpaarung aus Kap. 5.2. Das Rad erfordert aufgrund der größeren Durchmesser im Vergleich zum Ritzel einen aufwendigeren Umformprozess, da mehr Masse radial nach außen querverfließen muss. Das Rad ist sehr flach, besitzt einen relativ großen Kopfkreisdurchmesser und eine Innenbohrung (Bild 6.1).

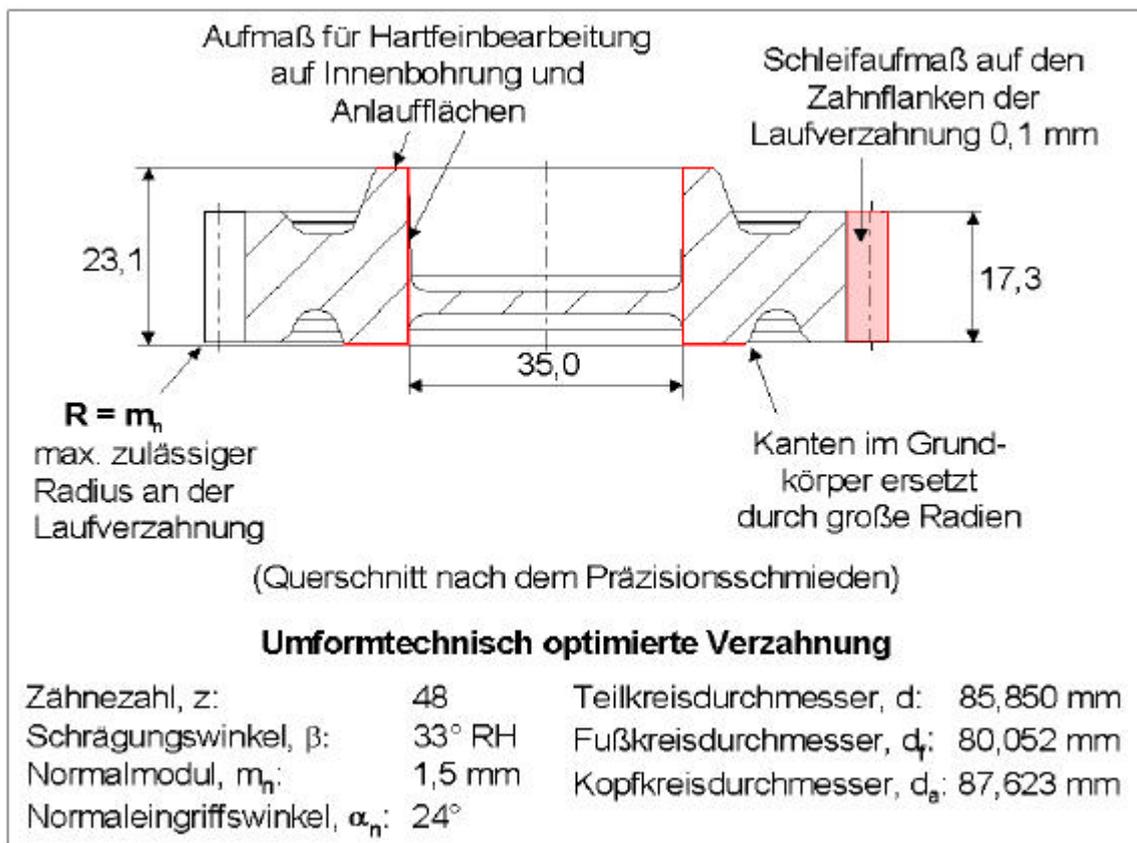


Bild 6.1 Auslegung des Schmiedeteils für das Rad mit umformtechnisch optimierter Verzahnung (vgl. Kap. 5.2)

Es müssen größere Fließwege realisiert werden und die Schrumpfung bei größeren Durchmessern ist höher, wodurch flache Zahnräder sehr empfindlich auf schwankende Rohteiltemperaturen reagieren.

Für eine günstige schmiedetechnische Gestaltung ist darauf zu achten, dass scharfe Kanten vermieden und Radien möglichst groß gewählt werden. Untersuchungen haben gezeigt, dass der Verzicht auf die vollständige Ausformung der Zahnecken (zulässiger Kantenradius \sim Normalmodul) zu einer Reduzierung des maximalen Werkzeuginnen-druckes um ca. 30% führen kann /Doeg99/. Für die spanende Endbearbeitung nach der Wärmebehandlung wird ein geringes Bearbeitungsaufmaß von 0,1 mm auf den Zahnflanken und den Anlaufflächen des Zahnrades angestrebt. Die Aufmaße der Bohrung sollen trotz der notwendigen Aushebeschrägen möglichst gering gewählt werden. Bild 6.1 zeigt die Auslegung des Rades als Schmiedefertigteil mit Aufmaßen und dem Butzen in der Innenbohrung, der nach dem Präzisionsschmieden ausgelocht wird.

6.2 Konzeption des Werkzeugs

Aufbau von Werkzeugen zum Präzisionsschmieden

Die fortschreitende Entwicklung des Präzisionsschmiedens zeigt eine Tendenz zu komplexeren Werkzeugsystemen, um den steigenden Anforderungen an die physikalischen und mechanischen Eigenschaften der Werkstücke und nicht zuletzt der Prozesssicherheit gerecht zu werden. Im Gegensatz zum herkömmlichen Schmieden im geschlossenen Gesenk, bei dem das Unterwerkzeug aus dem Gesenk mit Gravur und Ausstoßer und das Oberwerkzeug aus einem Stempel gebildet wird (vgl. Bild 2.1, rechts), besteht ein Präzisionsschmiedewerkzeug aus mehreren zusammengesetzten Funktionsgruppen.

Neben den formabbildenden Elementen, wie beispielsweise Matrize und Dorn wird ein Armierungsverband benötigt, der verhindert, dass die aus dem hohen Gesenkinnen-druck resultierenden Belastungen zu einem vorzeitigen Bruch der Matrize führen.

Zum Präzisionsschmieden von schrägverzahnten Zahnrädern ist eine Werkzeugtrennung notwendig (vgl. Bild 2.2). Es kommen daher auf einfach wirkenden Pressen Schmiedewerkzeuge mit Schließelementen zum Einsatz. Federbetätigte Schließ- und Haltevorrichtungen schließen das Gesenk. Das Schließsystem muss die erforderliche Bewegung der Werkzeugkomponenten ermöglichen und zum anderen die Schließkraft aufbringen, um ein ungewolltes Öffnen des Werkzeugs während der Umformung zu verhindern. Es werden Schließsysteme mit Hydraulikkomponenten, Gasdruck- oder Tellerfedern eingesetzt. Gasdruckfedern ermöglichen die Anpassung der Federkennlinie über den Gasdruck. Sie sind jedoch vor zu starker Erwärmung im rauen Schmiedebetrieb zu schützen. Tellerfedern sind unproblematisch, was die Arbeitstemperatur angeht, sie benötigen aber u.U. einen größeren Einbauraum gegenüber Gasdruckfedern.

Am IFUM wurden in der Vergangenheit zahlreiche Versuche zum Präzisionsschmieden von gerad- und schrägverzahnten Getrieberädern durchgeführt. Dabei wurden unterschiedliche Werkzeugkonzepte erprobt und bewertet. Aufbauend auf diesen Erfahrungen wurde ein modulares Werkzeugsystem entwickelt und konstruiert, mit dem schrägverzahnte Getrieberäder in wenigen Stufen geschmiedet werden können. Das Werkzeug wurde eingesetzt, um Rad und Ritzel mit zwei verschiedenen Verzahnungsgeometrien des fünften Ganges eines Pkw-Getriebes zu fertigen (vgl. Bild 5.4). Der modulare Aufbau des Werkzeugs ermöglicht das Schmieden von unterschiedlichen Zahnradgeometrien durch einfachen Austausch der formgebenden Elemente (vgl. Bild 6.26, 6.27).

Werkzeuge zum Präzisionsschmieden sollten modular aufgebaut sein. Die strenge Modularität der Funktionselemente sichert einerseits eine hohe Flexibilität hinsichtlich der Kombination verschiedener Funktionen zu einer Gesamtbaugruppe, andererseits ermöglicht sie die spätere Erweiterung oder Änderung existierender Module. Die Anpassung an geänderte Anforderungen ist also jederzeit möglich, so dass unterschiedliche Bauteilgeometrien mit einem Werkzeugsystem gefertigt werden können. So lassen sich die zusätzlichen Komponenten eines Präzisionsschmiedewerkzeugs, wie Schließsystem, Führungen etc. wiederverwenden. Zudem lassen sich Verschleißteile, wie die verzahnte Schmiedematrize, leicht austauschen.

Neben den teilebezogenen Einflussgrößen, wie Werkstückwerkstoff oder Werkstückgeometrie, beeinflussen auch die Verfahrensschritte vor und nach dem Umformprozess das Schmiedeergebnis. Die Entscheidung, ob das Schmiedeteil vom Rohralbzeug ausgehend umgeformt wird oder ob geschertes oder gesägtes massives Vollmaterial zum Einsatz kommt, ist für die nachfolgenden Prozessschritte von großer Bedeutung. Zudem wird auch die Wirtschaftlichkeit eines Schmiedeprozesses entscheidend von der Wahl des Rohteils beeinflusst.

Im Gegensatz zum konventionellen Schmieden kommt beim Präzisionsschmieden der Herstellung der Schmiederohteile durch Trennen eine wesentlich größere Bedeutung zu, da die Genauigkeitsanforderungen an die Rohteile deutlich größer sind. So muss je nach Schmiedeprozess eine Volumengenauigkeit von $\pm 0,5\%$ bis $\pm 1\%$ garantiert werden. Zusätzlich dazu ist die Einhaltung bestimmter geometrischer Toleranzen notwendig, da hierdurch eine gleichmäßige Formfüllung und die reproduzierbare Lage des Rohteiles im Gesenk gewährleistet wird. So ist für die Planung eines Schmiedeprozesses das genaue Wissen um die Einflüsse der Rohteileigenschaften auf das Prozessverhalten und das Prozessergebnis unerlässlich. Über die eigentliche Volumenschwankung hinaus können hier beispielsweise deformierte Scherflächen oder auch ein vorhandener Sägegrat die Oberflächengüte der Schmiedeteile beeinträchtigen.

Belastungskollektiv der Gesenke beim Präzisionsschmieden

Beim Präzisionsschmieden wird die Bauteilgeometrie direkt durch das Umformwerkzeug unter hohen Gesenkinnendrücken (bis zu $p_i = 1600$ MPa), hohen Werkstücktem-

peraturen ($T_{ws} = 1250^{\circ}\text{C}$) sowie innerhalb sehr kurzer Kontaktdruckberührzeiten ($t = 80..120 \text{ ms}$) abgebildet /Doeg99/. Die feingliedrigen Querschnitte einer verzahnten Schmiedematrize sind daher besonders starken Belastungen ausgesetzt. Dem Werkzeugverschleiß kommt für die Wirtschaftlichkeit eines Schmiedeprozesses eine zentrale Bedeutung zu. Schmiedegesenke unterliegen während der Umformung einem komplexen Belastungskollektiv aus thermischen, mechanischen und tribologischen Beanspruchungen. Die Belastung der Werkzeuge und damit ihre Standmenge kann über eine günstige verschleißmindernde Auslegung der Stadienfolge verringert werden.

Thermische Belastungen entstehen durch die Erwärmung des Werkzeuges aufgrund des Wärmeübergangs vom Werkstück ins Werkzeug und der Reibung zwischen warmem Schmiedeteil und Matrize. Im Werkzeugrandbereich können hierdurch Temperaturen von mehr als 600°C entstehen, wodurch die Anlasstemperatur des Matrizenwerkstoffes überschritten werden kann. Hierdurch nimmt der Verschleißwiderstand der Werkzeugrandzone stark ab. Das Werkzeug ist während eines Schmiedezyklusses durch die warmen Werkstücke und die Kühlschmierung extremen Temperaturwechseln ausgesetzt, wodurch die Bildung von Thermorissen begünstigt wird. /Schl93/

Mechanische Belastungen resultieren aus den hohen Innendrückerücken im Schmiedegesenk während der Umformung. Beim Präzisionsschmieden können Innendrucke bis zu 1600 MPa vorliegen. /Doeg99/

Tribologische Belastungen treten bei verzahnten Gesenken vor allem im Zahnkopfbereich der Matrize auf. Sie entstehen durch den Stofffluss entlang der Werkzeuggravur während der Umformung. Entscheidend beeinflusst werden die Vorgänge in der sogenannten Wirkfuge durch die Zwischenschicht, die im wesentlichen aus Zunderpartikeln, Schmierstoff und durch abrasive Mechanismen hinterbliebener Partikel besteht. /Doeg99/

Eine chemische Beanspruchung der Schmiedegesenke kann durch ein aus Kühl- und Schmiermitteln entstehendes Reaktionsgemisch auftreten. /Schl93/

Tribologische, mechanische und thermische Belastung der Matrize können über die Auslegung der Verzahnung und der Stadienfolge beeinflusst werden. Eine Stadienfolge für das Zahnradschmieden sollte daher vor allem eine kurze Druckberührzeit, geringe thermische und mechanische Werkzeugbelastungen in den einzelnen Umformstufen ermöglichen sowie den Verschleiß dort reduzieren, wo der wirtschaftliche Schaden am größten ist und Geometrieabweichungen am finalen Werkstück produziert.

Durchführung des Konzeptes

Eine Strategie zur Vermeidung von Werkzeugverschleiß besteht darin, dass das Zahnrad in allen Konturen mit Ausnahme der Zähne bereits vor Beginn der letzten Umformstufe abgebildet wird (Bild 6.2, Umformstufe 2). Dadurch wird der Werkstofffluss und die tribologische Belastung beim Verzahnungsschmieden in der 3. Umform-

stufe minimiert. Die Zähne werden mit sehr kurzer Druckberührzeit und geringen Belastungen in der abschließenden Stufe geformt (Bild 6.2, Umformstufe 3).

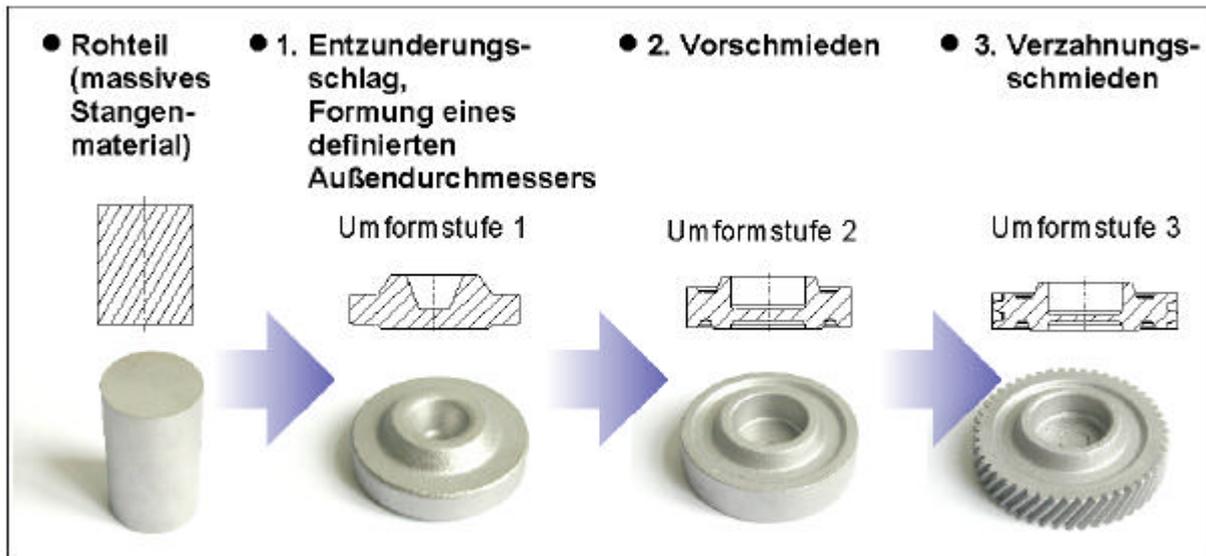


Bild 6.2: Stadienfolge des 3-stufigen Präzisionsschmiedeprozesses zur Herstellung von Pkw-Gangrädern

Im Folgenden wird ein Werkzeugsystem vorgestellt, das eine wirtschaftliche Umsetzung des Präzisionsschmiedens schrägverzahnter Stirnräder für Pkw-Getriebe auch auf kleinen Pressen mit geringem Einbauraum und Kräften ermöglicht. Als Umformmaschine wird eine Kupplungsspindelpresse der Firma Siempelkamp, Typ NPS 800 verwendet (vgl. Bild 6.6). Bei einer Tischaufspannfläche von 800 x 850 mm ist eine äußerst kompakte Bauweise der Schmiedewerkzeuge gefordert.

Die Vorschmiedeoperationen sind notwendig, um den Umformgrad in der Fertigschmiedestufe weitestgehend zu reduzieren. Die Vorstauchoperation wird nicht völlig frei durchgeführt, denn das Stauchteil soll eine definierte Außenkontur erhalten. Dadurch wird ein genaues Zentrieren des Teils in der jeweils nächsten Stufe möglich.

In der zweiten Umformstufe wird das Schmiedeteil so gestaltet, dass in der dritten Umformstufe nur noch die Laufverzahnung des Zahnrades abgebildet werden muss. Dabei fließt das Material radial in die Verzahnung. Das Schmiedeteil geht also mit fertig konturierten Stirnseiten in die letzte Umformstufe und erhält dort nur noch die schrägverzahnte Laufverzahnung. Der Außendurchmesser der Schmiedeteile ist geringfügig kleiner als der Fußkreisdurchmesser der Matrizenverzahnung. Der beschriebene Prozessablauf wurde mittels FEM simuliert und optimiert.

In der Fertigschmiedeoperation wird die Geometrie des Zahnrades bis auf die Innenbohrung vollständig abgebildet. Die Bohrung des Zahnrades wird weitestgehend vorgeschmiedet. Die dort verbleibende Materialhöhe in der dritten Stufe beträgt noch 3 mm.

Bisherige Untersuchungen am IFUM zum Präzisionsschmieden von Zahnrädern sind überwiegend von einstufigen Schmiedeprozessen und gesägten Rohrabschnitten als

Ausgangsmaterial ausgegangen (Bild 6.3, links). Aus wirtschaftlichen Erwägungen sollte jedoch massives Stangenmaterial als Halbzeug und wie oben erwähnt ein mehrstufiger Prozess zum Einsatz kommen. Dadurch ergeben sich erhebliche Unterschiede zu der bisherigen Technologie.

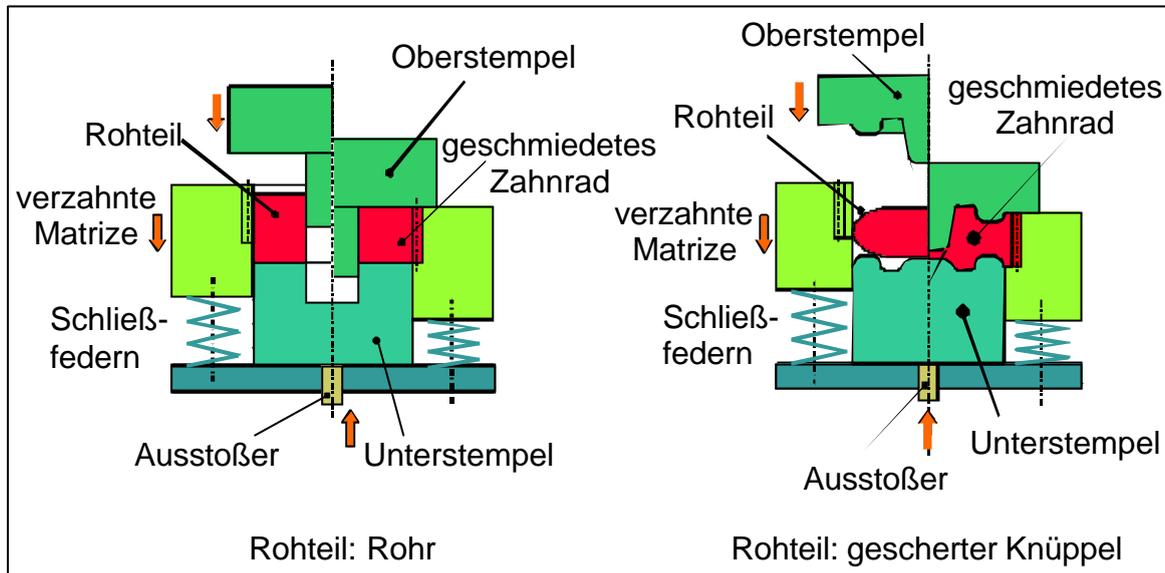


Bild 6.3: Werkzeugsysteme zum Präzisionsschmieden, links: Rohteil Rohr /West96/, rechts Rohteil gescherter Knüppel /Bohn99b/

Ein Werkzeugsystem, bei dem von einem Rohr als Halbzeug ausgegangen wird, ist in Bild 6.3, links dargestellt. Das Rohteil wird auf dem Unterstempel positioniert. Fährt der Stößel der Presse nach unten, so setzt der Oberstempel auf der Matrize auf und das Werkzeug wird geschlossen. Der Dorn fädelt das Rohteil auf und zentriert es auf diese Weise optimal in der Matrize.

Zwei unterschiedliche Werkzeugprinzipien können für das Verzahnungsschmieden ausgehend von einem gescherter Knüppel angewendet werden, wobei die Schließfedern entweder im Unter- oder im Obergesenk untergebracht werden können (vgl. auch Bild 2.2).

Die Schließfedern liegen bei dem Werkzeugsystem in Bild 6.3, rechts im Untergesenk. Zu Beginn des Arbeitshubes setzt der Oberstempel auf die Matrize auf und beginnt die Federn zu stauchen. Die Kräfte im Oberstempel und im Pressengestell steigen gleichmäßig an. Kurz danach beginnt bei geschlossenem Gesenk die eigentliche Umformung durch das Stauchen des Rohmaterials zwischen Ober- und Unterstempel.

Problematisch stellt sich bei diesen Werkzeugprinzipien die Trennfuge zwischen verzahnter Matrize und Unterstempel dar, da hier Grat entstehen kann, was ein Klemmen des Unterstempels bewirkt. Hierdurch könnte ein prozesssicherer Dauerbetrieb des Werkzeuges verhindert werden.

Für mehrstufige Prozesse ist bei Einsatz einer automatischen Transfereinrichtung eine bewegte Matrize (Bild 6.3) ungünstig. Das Werkzeugprinzip kann so modifiziert wer-

den, dass die Matrize ortsfest angeordnet wird. Die Relativbewegung zwischen Dorn und Schließplatte wird in die obere Werkzeughälfte gelegt (Bild 6.4). Dies hat den Vorteil, dass Handhabung und Werkzeugkühlung wesentlich erleichtert werden. Zudem ist diese Anordnung selbstreinigend. Die Kühlung und Schmierung der Gesenke kann durch einen Sprüharm realisiert werden, der nach dem Schmiedevorgang automatisch in den Pressenraum einfährt. Das Ausstoßen des Schmiedeteils kann schneller durchgeführt werden, da der Ausstoßer den Umformweg nicht zusätzlich zurücklegen muss.

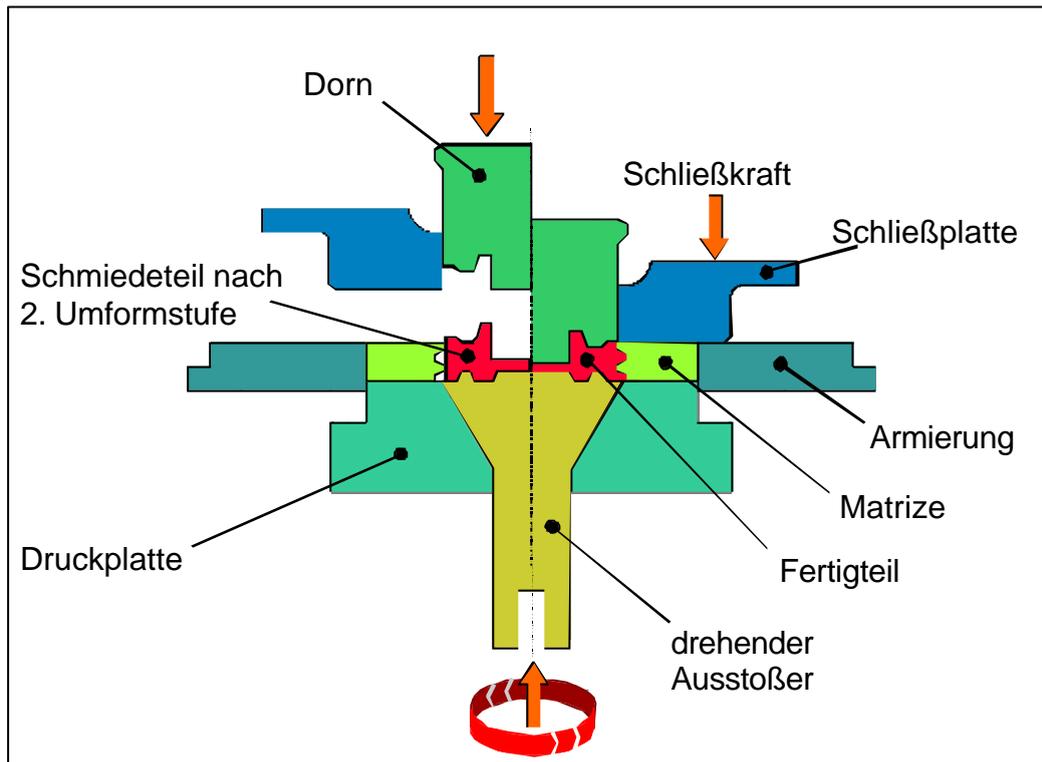


Bild 6.4: Aufbau der 3. Umformstufe zur Herstellung von Pkw-Gangrädern: Verzahnungsschmieden

Die Umformung beginnt, sobald der Dorn das Werkstück berührt. Vorher hat die Schließplatte auf das Untergesenk aufgesetzt und ein geschlossenes Gesenk erzeugt. Der Dorn dringt in das Werkstück ein und verdrängt den Werkstoff radial nach außen.

Ein weiterer Vorteil dieses Werkzeugsystems ist der selbstdichtende nach unten konisch zulaufende Ausstoßer. Durch die Geometrie kann sich also kein Grat zwischen Ausstoßer und Untergesenk bilden. Da das Untergesenk vollständig geschlossen ist, müssen Abflüsse für Wasserdampf vorgesehen werden. Der sich durch verdampfende Reste von Kühl- oder Schmiermittel bilden und u. U. eine vollständige Gesenkefüllung verhindern würde.

Für Zahnräder mit einem Schrägungswinkel von mehr als 20° sollte zur Verringerung der Ausstoßerkraft und um eine Verformung des verzahnten Bauteils beim Ausstoßen zu vermeiden, ein drehender Ausstoßer verwendet werden. Der Ausstoßer des Umformwerkzeugs wird hierzu über eine Führung entsprechend der Steigung des Schrä-

gungswinkels zusätzlich zur Ausstoßbewegung in eine Drehbewegung gezwungen. Auf diese Weise kann eine unerwünschte plastische Verformung des Zahnrades beim Ausstoßprozess verhindert werden.

Bei der kompakten Bauweise des dreistufigen Werkzeugs wird die Stufe, bei der die höchsten Umform- und Ausstoßerkräfte auftreten, zentriert in den Presseneinbauraum eingebaut.

Unter den Ausstoßern der ersten und zweiten Umformstufe werden Hydraulikzylinder angebracht, die nach dem Schmiedeschlag ausgelöst werden. In der dritten Umformstufe des Verzahnungsschmiedens kann, da diese Stufe in der Mitte des Pressentisches eingebaut wird, der Ausstoßer der Presse verwendet werden (vgl. Bild 6.5).

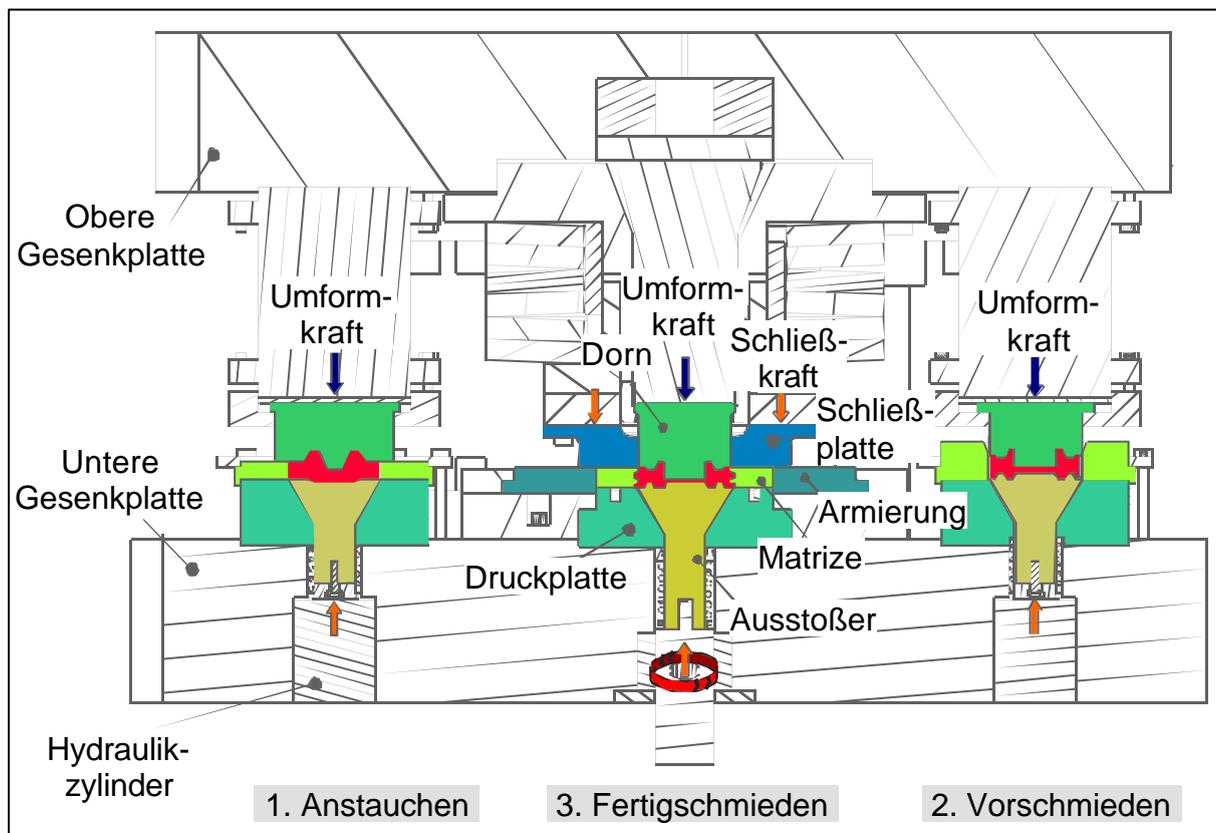


Bild 6.5: Umformwerkzeug mit drei Umformstufen, links: Stufe 1: *Anstauchen*, rechts: Stufe 2: *Vorschmieden*, Mitte: Stufe 3: *Verzahnungsschmieden*

Detaillierte Ausführungen zur Konstruktion des Werkzeugsystems finden sich in Kap. 6.5.

6.3 Umformmaschine

Die nachfolgend diskutierten Umformversuche und die Integration des Werkzeugs erfolgten auf einer Kupplungsspindelpresse der Firma Siempelkamp Typ SPS 800.

Der Präzisionsschmiedeprozess erfordert nicht nur ein hoch belastbares Werkzeug, sondern auch an die Werkzeugmaschine werden besondere Anforderungen gestellt.

Ausschlaggebend für die Verwendbarkeit einer Presse ist dabei nicht nur die genügend große Pressenkraft. Um eine gleichbleibend hohe Qualität der Präzisionsschmiedeteile erreichen zu können, dürfen die Prozessparameter des Umformvorgangs nur geringen Schwankungen unterliegen. Einerseits ist eine geringe Druckberührzeit gefordert, um den Temperaturverlust des Schmiedestückes und wie oben erläutert den Verschleiß in den Gesenken zu minimieren. Nicht zuletzt ist ein genügend großer Einbauraum an der Maschine für die komplexen Werkzeugsysteme notwendig.

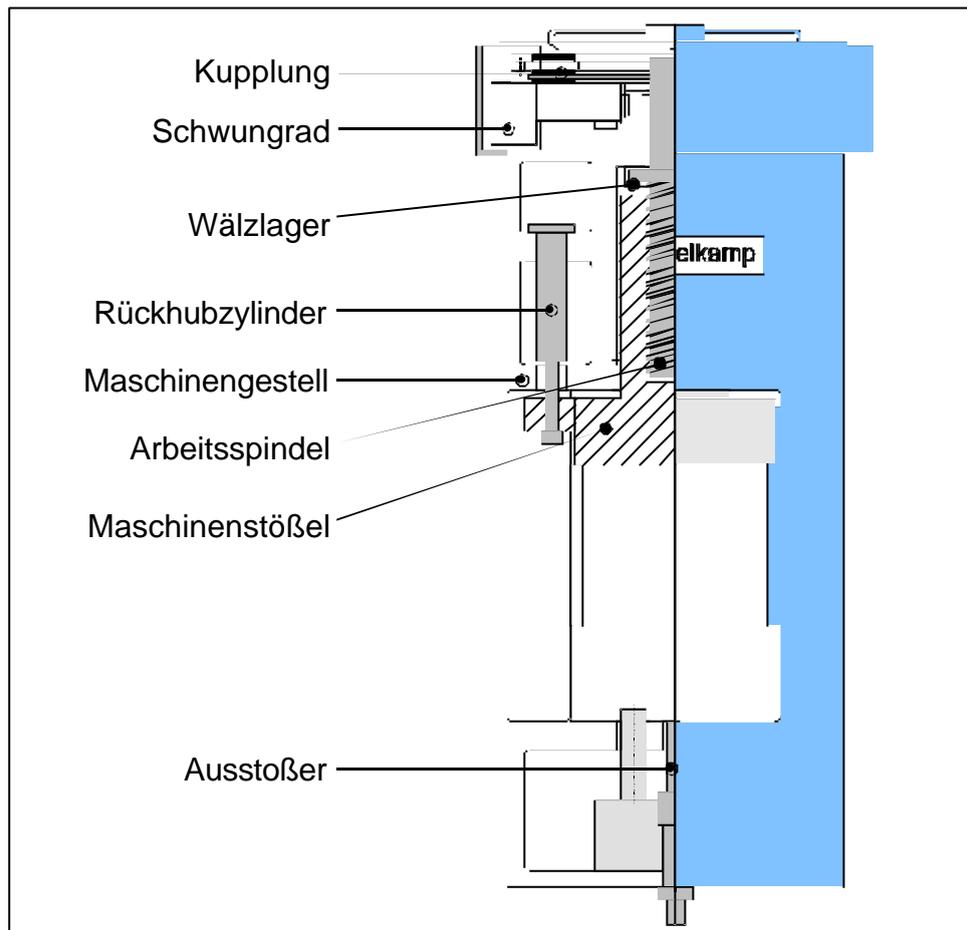


Bild 6.6: Skizze der verwendeten Kupplungsspindelpresse, Typ Siempelkamp SPS 800

Zum Präzisionsschmieden besonders geeignet sind Exzenterpressen und Kupplungsspindelpressen aufgrund ihrer Funktionsweise und ihrer Kennliniencharakteristik. Allerdings müssen bei der Kupplungsspindelpresse gewisse Vorbehalte gemacht werden. Das Problem dieses Maschinentyps besteht in der begrenzten Reproduzierbarkeit des Abschaltpunktes vor dem unteren Umkehrpunkt. Die damit verbundenen Probleme in Hinblick auf die Maßabweichungen am Teil können durch das Fahren auf feste Anschläge gemindert werden. Als Umformmaschine steht am IFUM eine Kupplungsspindelpresse der Firma Siempelkamp mit einer Nennkraft von $F_N = 8000 \text{ kN}$ zur Verfügung.

Die Prinzipskizze in Bild 6.6 verdeutlicht die grundsätzliche Funktionsweise dieser energiegebundenen Presse. Ein Elektromotor treibt ein Schwungrad an, das über dem Maschinengestell in Wälzlagern vertikal gelagert ist. Beim Betätigen einer hydraulischen Kupplung überträgt diese die kinetische Energie des Schwungrades auf die senkrecht im Maschinengestell gelagerte Arbeitsspindel, die den Maschinenstößel antreibt.

Das Ende des Arbeitshubs wird durch das Auskuppeln kurz vor dem unteren Umkehrpunkt ausgelöst. Der Rückhub des Stößels wird durch Rückhubzylinder vorgenommen, deren Hydraulikpolster während des Arbeitshubes vorgespannt werden. Auf diese Weise kann die Umschaltzeit und somit die Druckberührzeit am Ende der Umformung sehr kurz gehalten werden.

Aus diesem Funktionsprinzip ergeben sich die folgenden Vorteile einer Kupplungsspindelpresse:

- ◆ Übertragung der vollen Presskraft in annähernd jeder beliebigen Stößelposition,
- ◆ schnelle Arbeitshubfolge,
- ◆ kurze Druckberührzeiten und damit hohe Werkzeugstandmengen.

6.4 Auslegung der Stadienfolge mit Hilfe der FEM

Die Finite-Elemente-Methode hat sich in vielerlei Hinsicht bereits seit einigen Jahren als ein äußerst effizientes Hilfsmittel zur Auslegung von Schmiedeprozessen erwiesen. Bei der Planung eines dreistufigen komplexen Präzisionsschmiedeprozesses ist eine FEM-Simulation sehr hilfreich. Wesentliche Beiträge zur Lösung der vielschichtigen Problemstellungen, auf die in den vorigen Abschnitten bereits eingegangen wurde, können teilweise nur mit Hilfe der FEM geleistet werden. Die Aufgabenstellung der FEM für die Prozessentwicklung waren:

- Simulation des Ausgangsprozesses (Planungsvorgabe, d.h. erste Abschätzung der Stadienfolge),
- Vor- und Zwischenformauslegung des Umformprozesses, Optimierung der Stadienfolge und des Werkstoffflusses, Variation mit verschiedenen Dornen in der ersten Umformstufe, verschleißreduzierende Auslegung der Stadienfolge,
- Bestimmung des erforderlichen Kraft- und Energiebedarfes,
- Berechnung der zu erwartenden Werkzeugbelastungen sowie
- Vorhersage des Bauteilzustandes (Temperatur, Umformgrad und Spannungen im Präzisionsschmiedeteil).

Dabei wurden die spezifischen Randbedingungen, wie beispielsweise die maximale Pressenkraft ($F_N = 8000 \text{ kN}$) mit in die FEM-Untersuchungen einbezogen. Die FEM-Simulationen wurden mit den Programmen MSC MARC/Autoforge und FORGE 3

durchgeführt. Hierbei wurden in thermo-mechanisch gekoppelten Berechnungen sowohl 2D-rotationssymmetrische FEM-Modelle für die ersten zwei Umformstufen als auch 3D-FEM-Modelle für die dritte Umformstufe (Verzahnungsschmieden) mit starren und diskretisierten Werkzeugen verwendet.

6.4.1 Vor- und Zwischenformauslegung des Umformprozesses

Die Ausgangssituation bei der Auslegung und Planung des Präzisionsschmiedevorganges war ein dreistufiger Umformprozess (Stauhen, Vorschmieden, Verzahnungsschmieden). Bei der Ausgangsgeometrie des Oberwerkzeuges der Umformstufe 1 sollte nach konventioneller Auslegung eine ebene Stauhenplatte verwendet werden. Die ersten FEM-Simulationen des Ausgangsprozesses ergaben einen sehr großen Kraftbedarf und erhebliche Werkzeugbelastungen insbesondere in der Umformstufe 2. Detaillierte Ergebnisse hierzu werden in diesem Kapitel im Abschnitt **thermische und mechanische Werkzeugbelastung** aufgezeigt.

Daraus ergab sich die Notwendigkeit, den Werkstofffluss in den jeweiligen Umformstufen und damit die Vor- und Zwischenformgeometrien so zu gestalten, dass der erforderliche Kraft- und Energiebedarf über alle drei Umformstufen optimiert und die maximale Pressenkraft nicht überschritten wird. Vor diesem Hintergrund wurden unterschiedliche Geometrien des Oberwerkzeuges (OWZ) der Stufe 1 konzipiert (Bild 6.7).

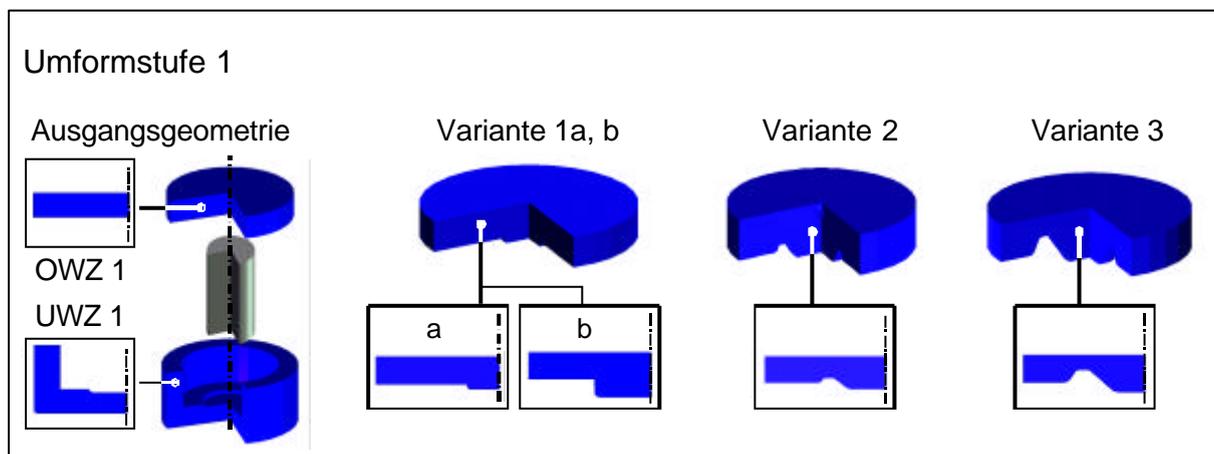


Bild 6.7: Werkzeugvarianten der Umformstufe 1, Anstauchen

Die Form des Unterwerkzeuges (UWZ) mit eingebrachter Zentrierungskontur für das Rohteil blieb bei allen betrachteten Varianten gleich. Hauptziel hierbei war, eine geeignete Volumenvorverteilung für den Einsatz in der Umformstufe 2 zu realisieren. Als günstigste Oberwerkzeugform stellte sich Variante 3 heraus. Durch diese Variante konnte eine deutlich homogenere Formfüllung in der Umformstufe 2 realisiert werden, was wiederum einen geringeren Kraftbedarf und vor allem eine niedrigere mechanische Werkzeugbelastung mit sich brachte. Die Werkzeugformen der Umformstufen 2 und 3 bleiben unverändert, da in der Umformstufe 2 die festgelegten Bauteilendkontu-

ren der Stirnseiten und in der Umformstufe 3 die der Verzahnungen abgebildet werden. Das [Bild 6.8](#) zeigt die Werkzeuge der Umformstufe 2 und 3, wie sie im FEM-Modell berücksichtigt wurden.

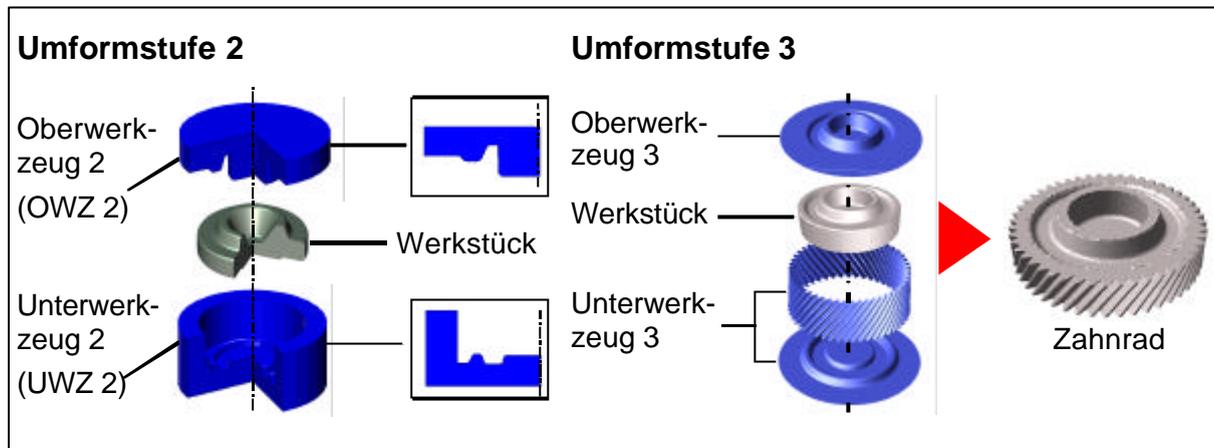


Bild 6.8: Werkzeuge der Umformstufen 2 und 3, (vgl. Bild 6.2)

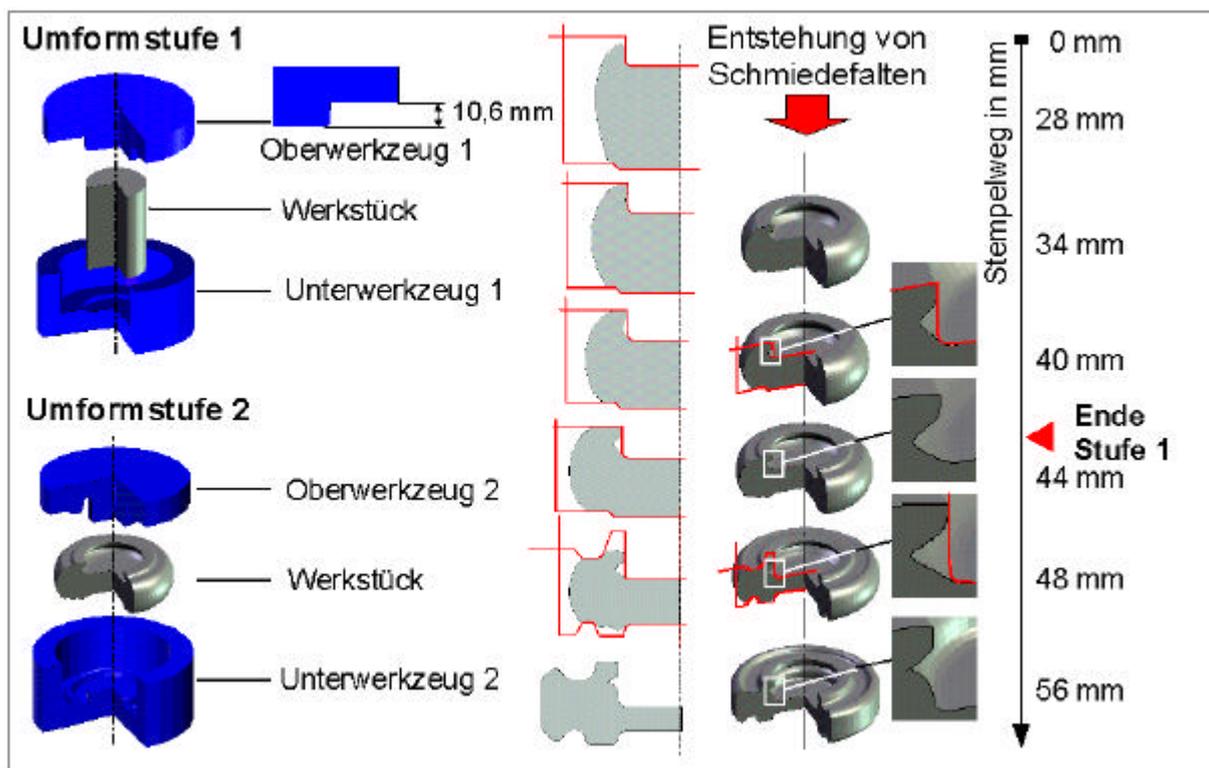


Bild 6.9: Schmiedefaltenbildung bei Variante 1b des Oberwerkzeuges 1

Die Oberwerkzeugvariante 1 b (vgl. Bild 6.7) erwies sich als ungeeignet, da sich durch diese Werkzeuggeometrie Schmiedefalten bildeten ([Bild 6.9](#)).

Diese Werkzeugvariante wurde entsprechend des ungeeigneten Schmiedeergebnisses in der Simulation nicht weitergehend untersucht. Die [Bilder 6.10](#) und [6.11](#) geben die Kraft-Weg-Verläufe der Oberwerkzeuge in den jeweiligen Umformstufen 1 und 2 wieder.

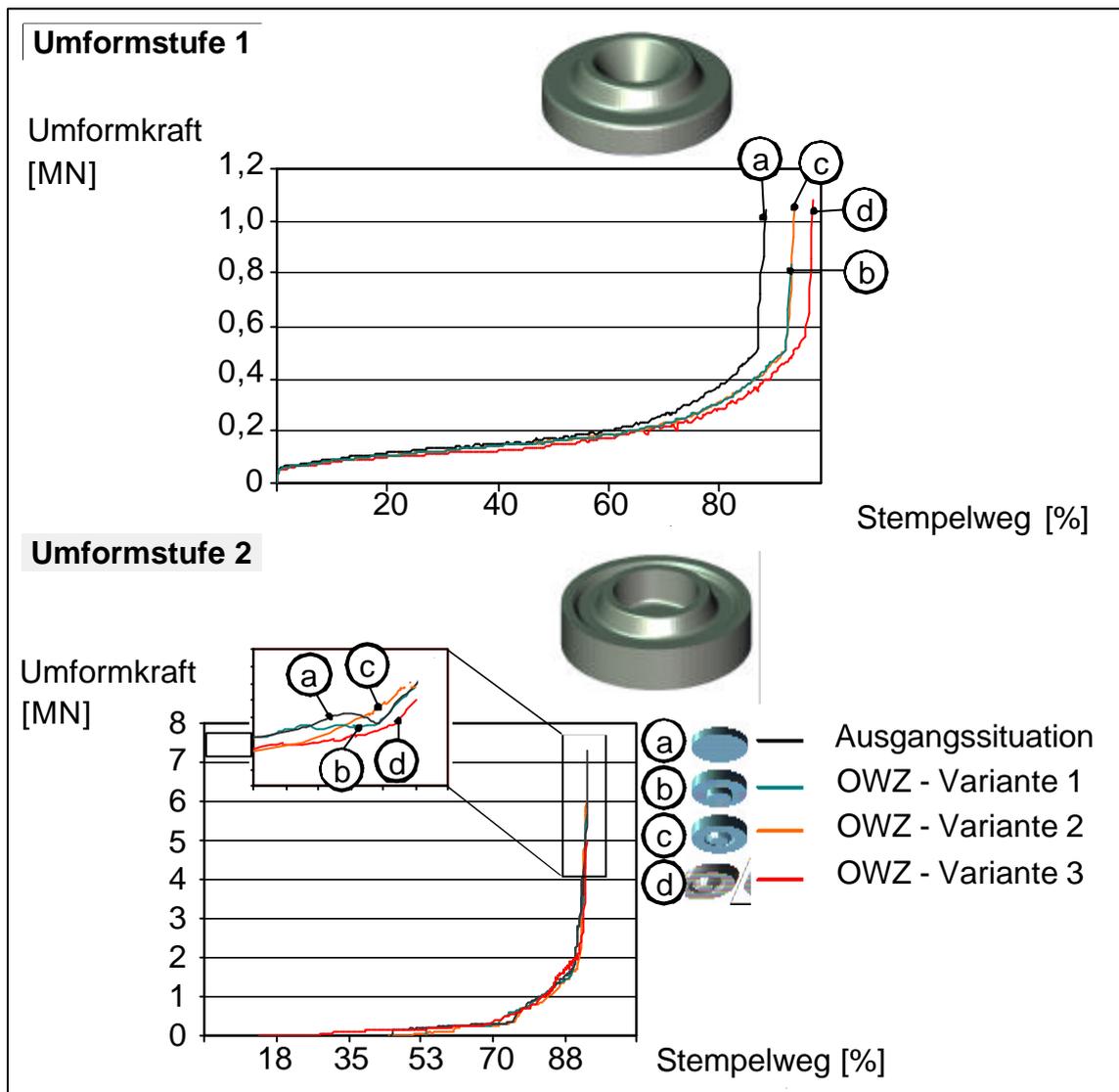


Bild 6.10: Kraft - Weg - Verläufe der Umformstufen 1 und 2

Aus Bild 6.10 wird ersichtlich, dass der Kraftbedarf in der Umformstufe 2 durch den Einsatz der Werkzeugvariante 3 in der Umformstufe 1 um 32% gesenkt werden kann. Die Werkzeugvariante 3 zeichnet sich durch eine starke Ausbildung von Ölnut und Innenbohrung aus. Der Kraftbedarf in der Umformstufe 1 bleibt gegenüber der Werkzeugausgangsgeometrie annähernd gleich. Mit dieser Werkzeugvariante der Umformstufe 2 liegt in Bezug auf die Umformkraft und die Werkzeugbelastung ein Optimum vor.

Detaillierte Ausführungen hierzu werden im Abschnitt **thermische und mechanische Werkzeugbelastung** gegeben.

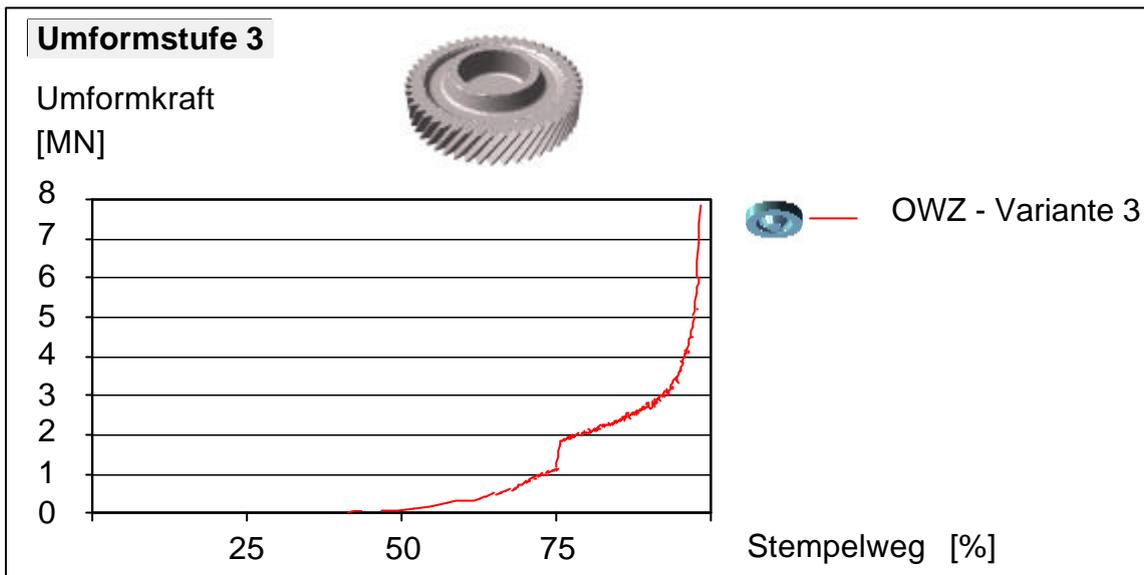


Bild 6.11: Kraft – Weg - Verlauf der Umformstufe 3

6.4.2 Optimierte Stadienfolge und Werkstofffluss

Aus den FEM-Simulationen der verschiedenen Oberwerkzeugvarianten der Umformstufe 1 (vgl. Bild 6.7) resultierte eine optimale Stadienfolge (vgl. Bild 7.2). Die Auswertungen der Kraft - Weg - Verläufe und des Werkstoffflusses in den Umformstufen 1 bis 3 ergaben eine optimierte Stadienfolge und einen optimierten Materialfluss unter Verwendung der Variante 3 (Bild 6.8). Die Bilder 6.12 und 6.13 zeigen den daraus hervorgehenden Werkstofffluss in den einzelnen Umformstufen in Abhängigkeit vom Stempelweg.

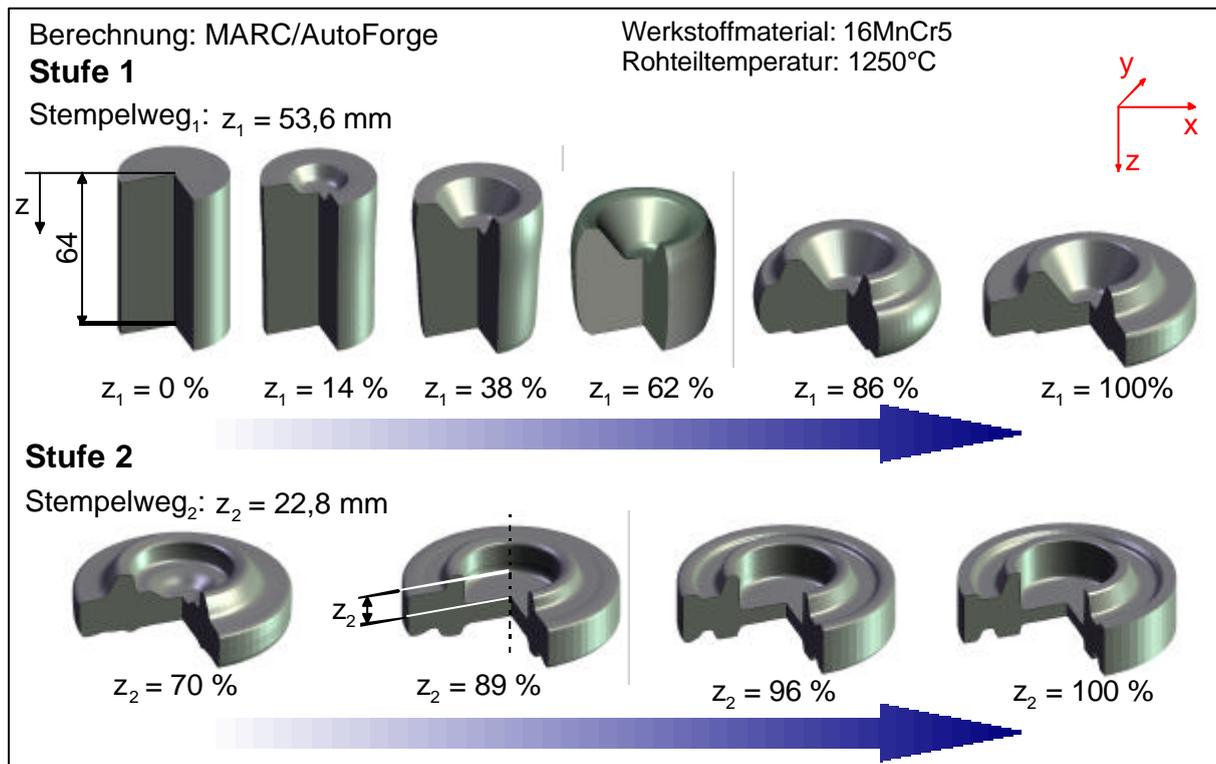


Bild 6.12: Werkstofffluss in der Umformstufe 1 und 2

In Bild 6.12 ist zu erkennen, dass bereits am Ende der Umformstufe 1 ($z_1 = 100\%$) ein Großteil des Bauteilvolumens aus dem Auslochbereich verdrängt worden ist. Somit ist in der Umformstufe 2 bedeutend weniger Umformarbeit zu leisten. Dies führt zu einer wesentlich geringeren mechanischen Werkzeugbelastung in der Umformstufe 2. Dieser Zusammenhang ist bedeutend für die Umformstufe 2, da die Belastung der Werkzeugausgangsgeometrie während dieser Stufe als sehr hoch ermittelt wurde, so dass bleibende plastische Deformationen zu erwarten waren.

Bereits beim Umformen in der Stufe 2 handelt es sich um einen Präzisionsschmiedevorgang, bei dem Endkonturen bzw. -flächen auf der Ober- und Unterseite des Zahnrades in einem geschlossenen Gesenk erzeugt werden. Bei diesem Vorgang dringt das Oberwerkzeug (Dornbereich) bereits so tief in das Werkstück ein, dass die Dicke des verbleibenden Schmiedespiegels lediglich noch 5,5 mm beträgt.

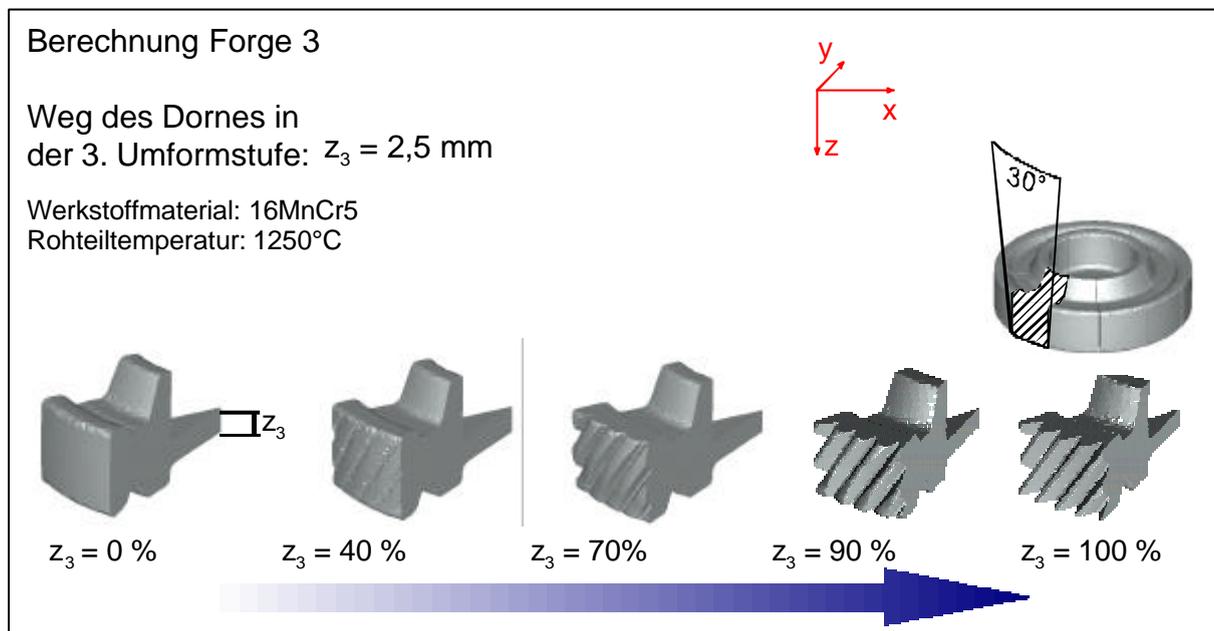


Bild 6.13: Werkstofffluss in der 3. Umformstufe

Dieser Schmiedespiegel wird dann durch axiale Bewegung des Oberwerkzeuges der Umformstufe 3 auf 3 mm verringert. Das Werkstückvolumen wird dadurch in radialer Richtung in die Verzahnungsmatrize gedrückt (Bild 6.13). Erst ab ca. 90% des zurückgelegten Stempelweges bildet sich die Verzahnung vollständig aus. Bei dieser FEM-Simulation (3D thermo-mechanisch gekoppelt) wurde zur Verringerung des Rechnungsaufwandes ein 30° -Segment verwendet. Am Ende der Umformstufe 3 ($z_3 = 100\%$) ist eine vollständige Füllung der Gravur zu erkennen.

6.4.3 Thermische und mechanische Werkzeugbelastung

Wie bereits ausgeführt, bilden die Werkzeugformen der Umformstufen 2 und 3 die Konturen des Fertigbauteils ab. Demzufolge bestand Optimierungspotential in den FEM-Simulationen hinsichtlich verschiedener Vor- bzw. Zwischenformen lediglich

zwischen der Umformstufe 1 und 2. Erste Berechnungen der Werkzeugbelastungen in diesen beiden Umformstufen ergaben die höchsten Werkzeugbeanspruchungen am Ende der Umformstufe 2. 2D-rotationssymmetrische FEM-Simulationen (thermo-mechanisch gekoppelte Analysen) sollten hierzu durch vergleichende Rechnungen näheren Aufschluss geben. Das [Bild 6.14](#) zeigt die Gegenüberstellung der rechnerisch ermittelten thermischen und mechanischen Beanspruchungen der Werkzeuge der Umformstufe 2 am Ende der Umformung bei Verwendung der Werkzeugvariante 3 und der Ausgangsvariante für die 1. Umformstufe.

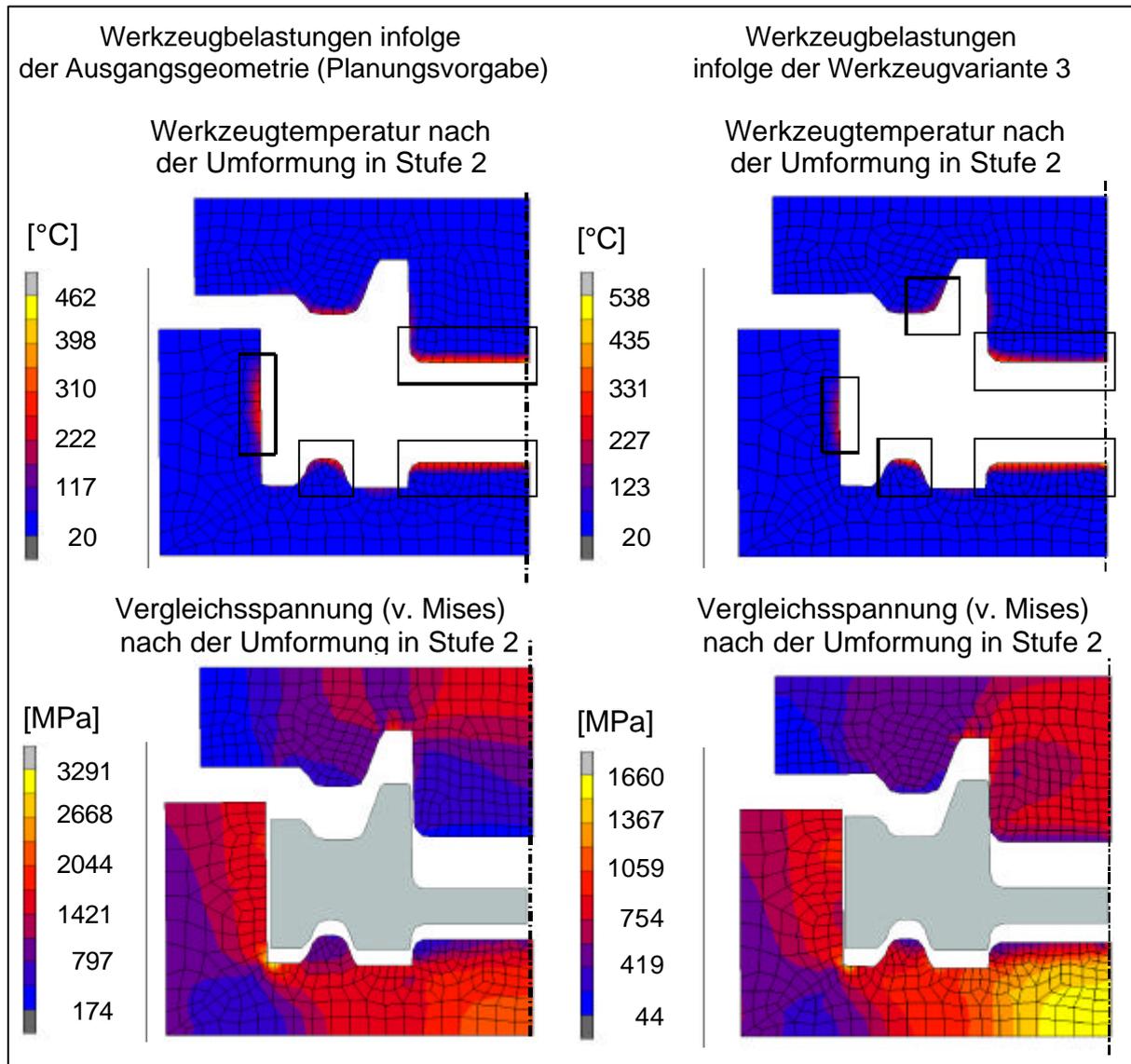


Bild 6.14: Thermische und mechanische Werkzeugbelastung der Umformstufe 2, links: infolge der Ausgangsgeometrie der 1. Umformstufe, rechts: infolge der Werkzeugvariante 3 der 1. Umformstufe

Bei der Werkzeugvariante 3 wurde am Ende der Umformstufe 2 eine im Kontaktbereich des Werkzeuges zum Werkstück um 76 K höhere Werkzeugtemperatur ermittelt. Der Hauptgrund für dieses Ergebnis ist der intensivere Kontakt zwischen Werkstück und Werkzeug, der einen stärkeren Wärmeaustausch bedingt. Ferner ermöglicht die

starke Vorformung des Bauteils in der Umformstufe 1 einen Wärmeaustausch über größere Kontaktflächen und es wird zusätzlich dazu in starkem Maße Reibungswärme in den betreffenden Bereichen erzeugt, obwohl die Drückberührzeiten etwas geringer sind.

Aufschluss über die mechanischen Werkzeugbelastungen geben die ermittelten Spannungen (Vergleichsspannung nach v. Mises) im Werkzeug. Im FEM-Modell gingen ausschließlich die thermo-elastischen Werkstoffdaten der Werkzeuge (Warmarbeitsstahl: 1.2367 / X38CrMoV5-3) ein. Dieser Warmarbeitsstahl lässt sich auf maximal 2050 MPa vergüten. Bild 6.14 (unten) gibt die Spannungsverteilung in den Werkzeugen wieder. Die FEM-Berechnungen der Ausgangswerkzeuge zeigen einen maximalen Spannungswert von 3291 MPa im Kerbbereich des Unterwerkzeuges unter Einwirkung der maximalen Umformkraft. Ferner wurden in weiten Bereichen der Kontaktfläche des Unterwerkzeuges Spannungen oberhalb der Fließspannung des vergüteten Warmarbeitsstahls (1.2367) ermittelt. Im Umformprozess wäre also mit erheblichen plastischen Deformationen des Werkzeuges zu rechnen gewesen. Demgegenüber konnte bei der Werkzeugvariante 3 der rechnerisch ermittelte Maximalwert der Vergleichsspannung um die Hälfte ($\sigma_V = 1660$ MPa) gesenkt werden. Gleiche Verhältnisse gelten auch für den Grundkörper der Werkzeuge. Damit sind Grundvoraussetzungen zur Realisierung der beim Präzisionsschmieden geforderten hohen Maß- und Formgenauigkeit des Bauteiles gegeben.

Kleine Radien in Schmiedegesenken sind hinsichtlich der Belastbarkeit der Gesenke kritisch. Im Kerbbereich können Risse entstehen. Insbesondere ist bei solchen Werkzeuggeometrien auf die Vergütung des Gesenkes zu achten, da mit steigenden Härtewerten die Gefahr der Rissbildung zunimmt.

Die Optimierung mittels FEM-Simulation der Vor- und Zwischenform ergab, dass die Variante 3 der Werkzeuggeometrie in der Umformstufe 1 den mit Abstand günstigsten Werkstofffluss erzielt. Folglich ist mit einer deutlich geringeren Werkzeugbeanspruchung zu rechnen.

6.4.4 Temperatur, Umformgrad und Spannungen im Präzisionsschmiedeteil

Im Bild 6.15 – 6.17 sind die wichtigsten Ergebnisse bezüglich der Bauteilzustände der drei Umformstufen, ausgehend von der optimierten Vorformvariante 3 der Umformstufe 1, wiedergegeben. Das Materialverhalten des Werkstückes (Einsatzstahl: 1.7131 / 16MnCr5) wurde in 2D-rotationssymmetrischen und in 3D FEM-Simulationen als elastisch-plastisch angenommen.

Die Temperaturverteilungen im Bild 6.15 lassen erkennen, dass in Werkstückbereichen, in denen es zu einem längeren Kontakt mit den Werkzeugen kam, die Temperaturen deutlich niedriger als im Körperinnern sind. Dort entstehen hohe Temperaturgradienten, die jedoch bei längeren Halte- oder Transportzeiten zwischen oder im An-

schluss an die Umformstufen durch Wärmeleitung abnehmen. Bemerkenswert sind in diesem Zusammenhang der mit über 500 K recht große aber zugleich für einen solchen Schmiedeprozess nicht unübliche Temperaturunterschied im Werkstück am Ende der Umformstufen 2 und 3. Die Mindesttemperaturen des Werkstückes von 710°C bzw. 707°C sind ein Indiz dafür, dass sich die Umformung des Werkstückwerkstoffes überwiegend in einem gut umformbaren austenitischen Zustand (γ -Phase) durchgeführt wird.

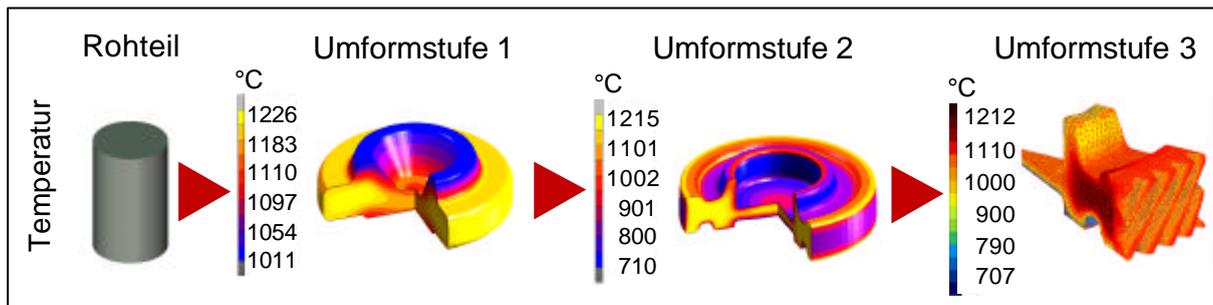


Bild 6.15: Temperaturentwicklung des Werkstückes in der Stadienfolge

Bild 6.16 zeigt die rechnerisch ermittelten Umformgrade der einzelnen Umformstufen. Ein wesentlicher Effekt der Warmmassivumformung ist das sehr gute Fließverhalten der Werkstoffe in der γ -Phase der Stähle. Damit können auch hohe Umformgrade realisiert werden. Der errechnete maximale Umformgrad von 5,3 am Ende der Umformstufe 3 im Auslochbereich des Bauteils ist daher problemlos in der Praxis realisierbar.

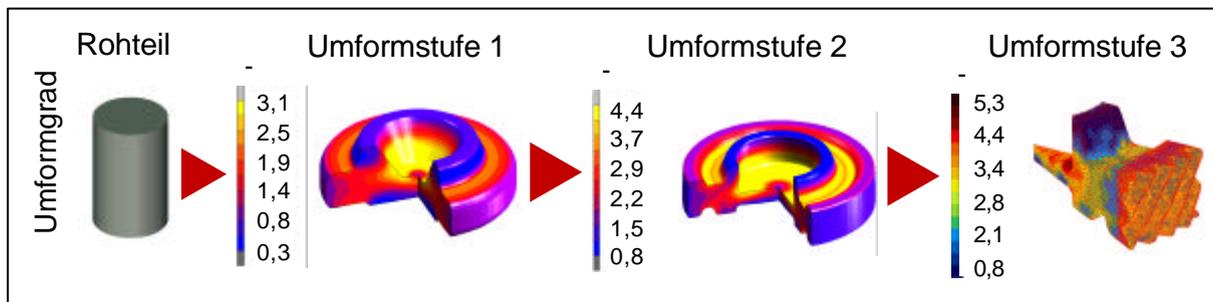


Bild 6.16: Umformgradverlauf des Werkstückes in der Stadienfolge

Die Höhe der Bauteilspannungen hängt in starkem Maße vom Schließzustand der Werkzeuge ab. Die in Bild 6.17 dargestellten Maximalwerte der Spannungen geben die Tendenz zu höheren Spannungswerten im Bauteil bei Präzisionsschmiedungen im geschlossenen Gesenk wieder. In der Umformstufe 1 werden die Werkzeuge nur so weit zusammengefahren, dass die äußere Umlauffläche zwar in Kontakt jedoch nicht über die gesamte Flächenbreite mit dem Werkzeug steht. Hingegen entsteht zum Ende der Umformstufen 2 und 3 bei vollständiger Ausfüllung der Werkzeugform und damit entsprechend präziser Maß- und Formgenauigkeit der Bauteile infolge des vollständig geschlossenen Gesenkes im Werkstück ein quasi hydrostatischer Spannungszustand. Dem Werkstück wird in diesem Zustand nicht die Möglichkeit gegeben, diese hohen Spannungen durch plastisches Fließen abzubauen.

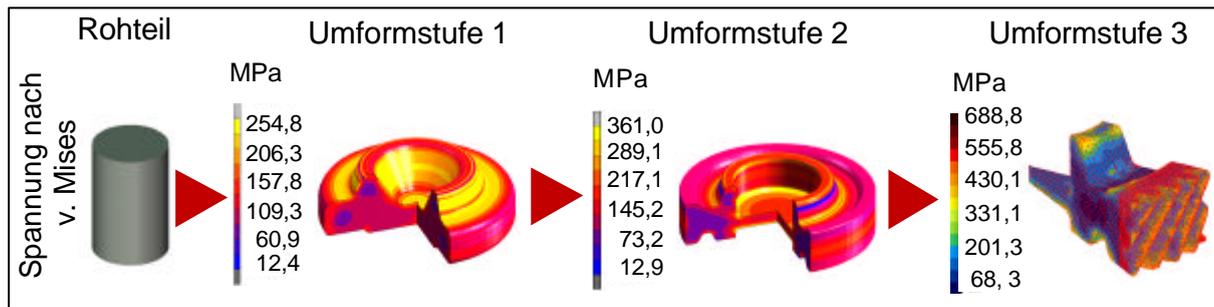


Bild 6.17: Spannungen des Werkstückes in der Stadienfolge

Die Erkenntnisse aus den FEM-Simulationen fließen direkt in die Werkzeugkonstruktion im folgenden Kapitel ein.

6.5 Werkzeugkonstruktion

Der mehrstufige Präzisionsschmiedeprozess und die komplexe Werkstückgeometrie stellen an die verzahnte Matrize und alle anderen formgebenden Elemente hohe Anforderungen. Der Werkzeugkonstruktion liegen die in Kap. 6.2 beschriebenen Verfahrensabläufe und Randbedingungen zugrunde. Es ergeben sich für das Werkzeug folgende Anforderungen:

- ◆ hohe Führungsgenauigkeit (Lage von Ober- zu Unterwerkzeug)
- ◆ das Werkzeugsystem soll drei Stufen beinhalten,
- ◆ die Vorverzahnung des Zahnrades soll vollständig durch Präzisionsschmieden erzeugt werden,
- ◆ eine Vorformstufe soll das Rohteil zunächst entzndern und eine definierte Zentrierfläche für die Zwischenstufe bereitstellen,
- ◆ in der Zwischenform soll die Stirnkontur des Rades erzeugt und ebenfalls eine definierte Zentrierfläche für die nächste Stufe geformt werden,
- ◆ in der Fertigform wird die Verzahnungskontur gefertigt und die Stirnkontur fertiggeformt,
- ◆ ein zentriertes Einlegen des Rohteils bzw. der Vorformen muss in jeder Stufe möglich sein,
- ◆ das Gesenk der 3.Stufe soll kraftschlüssig durch Tellerfedern geschlossen werden,
- ◆ ein modularer Aufbau des Werkzeuges soll das Schmieden von unterschiedlichen Zahnradgeometrien durch Austausch der formgebenden Gravurelemente und eine schnelle Umrüstbarkeit ermöglichen sowie einen schnellen Austausch einzelner Bauteile und Bauteilgruppen mit starkem Verschleiß,

- ◆ lineare und rotatorische Bewegung des Ausstoßers müssen so aufeinander abgestimmt sein, dass die resultierende Bewegung exakt der Schrägung der Zahnflanken folgt und so ein Entformen des Schmiedeteils möglich ist,
- ◆ mit dem Werkzeug sollen sowohl rechts-, als auch linksverzahnte Zahnräder gefertigt werden.

Das gemäß diesen Anforderungen gebaute Werkzeug besteht aus einem Ober- und Unterwerkzeug, die zueinander über ein Säulengestell geführt werden. Dieses Säulengestell soll die exakte Positionierung des Oberwerkzeugs zum Unterwerkzeug beim Montieren der oberen Gesenkplatte am Maschinenstößel und der unteren Gesenkplatte auf dem Maschinentisch sicherstellen.

6.5.1 Unterwerkzeug

Die untere Gesenkplatte dient der Aufnahme der unteren Gesenke der drei Umformstufen und der beiden eingepressten Führungssäulen (Bild 6.18).

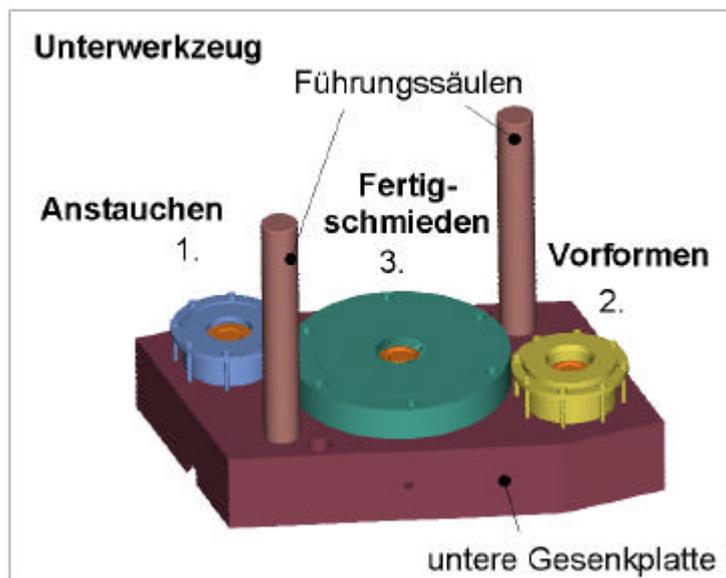


Bild 6.18: Unterwerkzeug mit drei Umformstufen (vgl. Bild 6.2) und Säulen zur Führung des Oberwerkzeugs

Unterwerkzeug 1. Stufe und 2. Stufe

Die Druckplatten der 1. und 2. Stufe (Bild 6.19), in der der konische Ausstoßer sitzt, sind jeweils in eine Vertiefung auf der Diagonalen der Gesenkplatte eingelassen. Auf der Druckplatte sitzt mit einem Zentrierbund der Gesenkring, der den zylindrischen Außendurchmesser der Vorform abbildet. Ein Ring spannt den Gesenkring und die Druckplatte auf die Gesenkplatte.

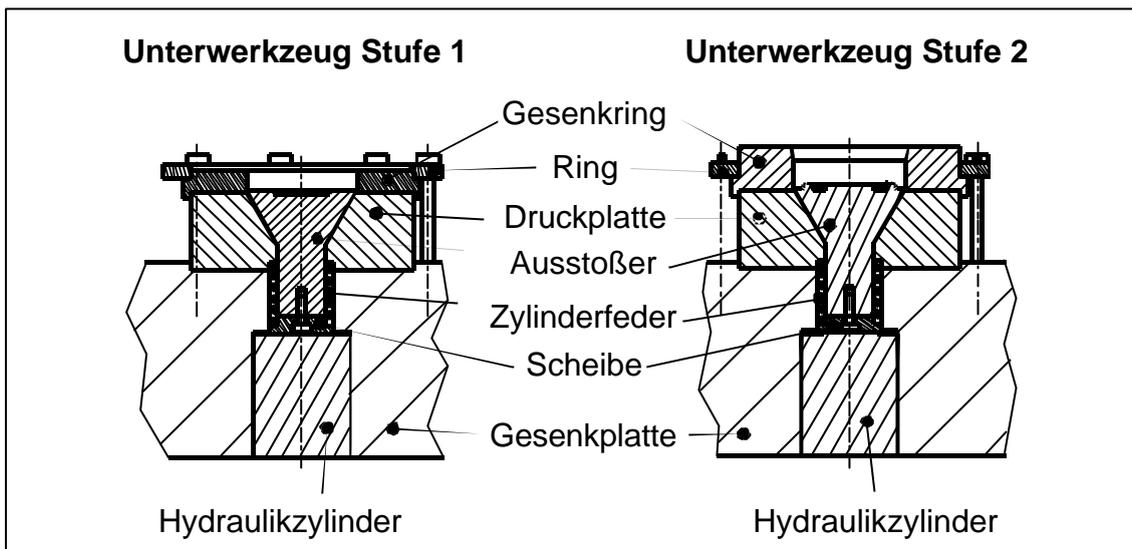


Bild 6.19: Unterwerkzeuge der 1. und 2. Umformstufe (Anstauchen und Vorschmieden)

Der über einen Kegelsitz in der Druckplatte selbstzentrierende Ausstoßer wird von unten über einen in der Gesenkplatte eingelassenen Hydraulikzylinder betätigt. Die Ölzuleitung zum Zylinder wird durch eine Nut an der Unterseite der Gesenkplatte seitlich aus dem Werkzeug herausgeführt. Mit einer Zylinderfeder zwischen der Druckplatte und einer an der unteren Stirnfläche des Ausstoßers verschraubten Scheibe wird der Ausstoßer bei drucklosem Zylinder zurückgestellt. In der 1. Stufe zentriert eine flache, gefaste Bohrung in der oberen Stirnseite des Ausstoßers das eingelegte Rohteil. In der 2. Stufe bildet die Ausstoßeroberfläche die Stirnseite des Zahnrades ab. Die Bauteile Gesenkring, Druckplatte, Ausstoßer und Rückstellfeder lassen sich von oben, also auch bei eingebautem Werkzeug ein- und ausbauen. Gesenkwechsel können so zum Schmieden anderer Geometrien komfortabel durchgeführt werden. Ebenso lassen sich verschlissene Teile leicht auswechseln.

Unterwerkzeug 3. Stufe (Verzahnungsschmieden)

Die armierte verzahnte Matrize wird über einen Bund auf der Druckplatte zentriert und von oben durch einen Spannring auf die Druckplatte gespannt. Sie bildet die Verzahnung am Werkstück ab.

Die Druckplatte der 3. Stufe nimmt in einem Kegelsitz den selbstzentrierenden Ausstoßer auf, der mit seiner oberen Stirnfläche die Seitenkontur des Zahnrades abbildet ([Bild 6.20](#)). Auf dem zylindrischen Schaft des Ausstoßers unter der Druckplatte wird eine Zylinderfeder geführt, die mit einem Sicherungsring am Ausstoßer über ein Axiallager gegen die untere Stirnfläche der Druckplatte gespannt ist und den Ausstoßer in den Kegelsitz drückt. Diese Baugruppe wird von oben in eine Zentrierbohrung in der Mitte der unteren Gesenkplatte eingelassen und mit einem Spannring über einen Zentrierbund gespannt. Auch hier ist ein schnelles Austauschen der gesamten Baugruppe bei eingebautem Werkzeug nach oben möglich.

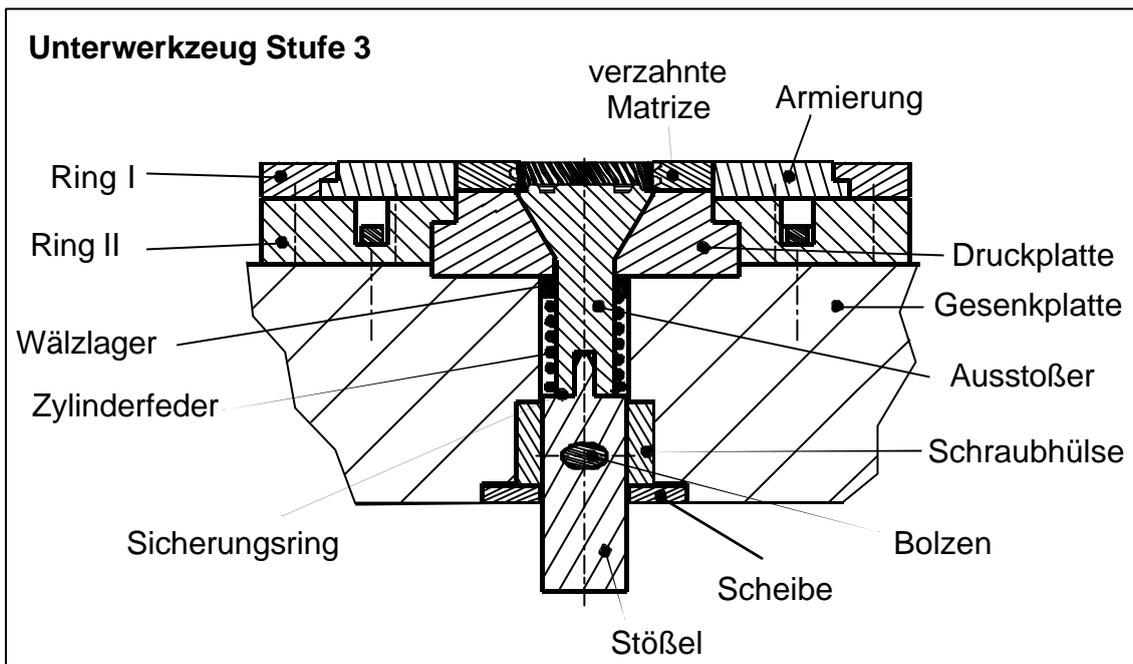


Bild 6.20: Unterwerkzeug der 3. Umformstufe (Fertigschmieden)

In einer Zentrierbohrung an der Unterseite der Gesenkplatte sitzt eine Schraubhülse (Bild 6.20) mit schraubenförmig ausgebildeter Nut die durch eine Passfeder in der Gesenkplatte gegen Verdrehen und mit einer geschraubten Scheibe gegen Herausrutschen gesichert ist. Ein Stößel wird mit einem radial eingepressten Bolzen in der Schraubhülse geführt.

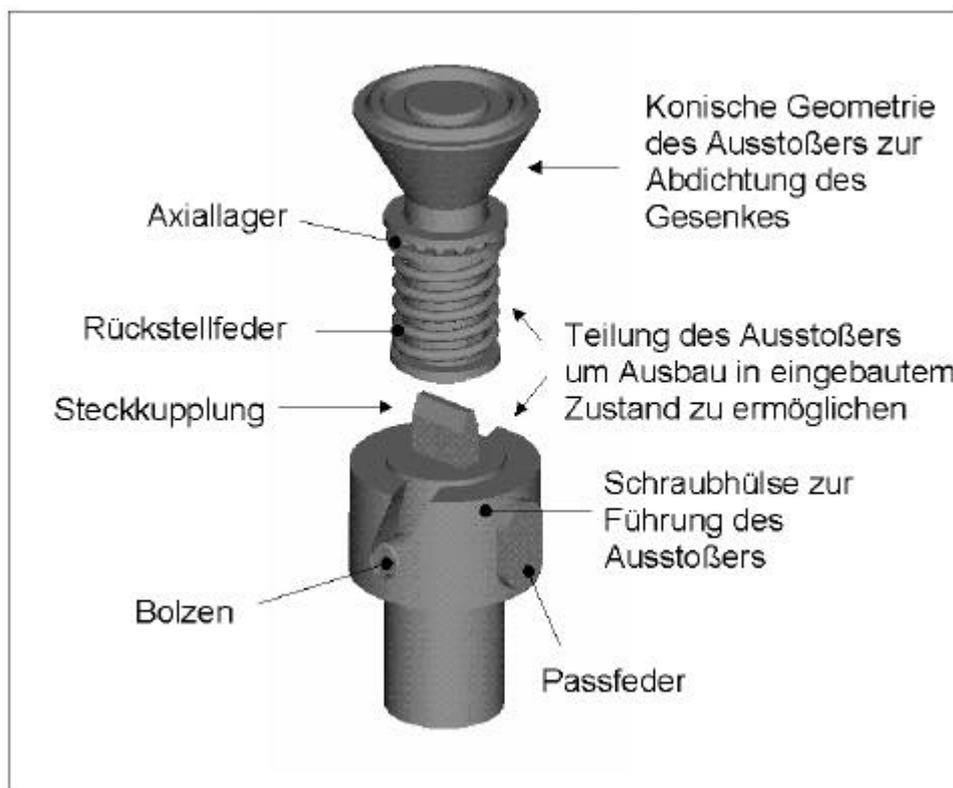


Bild 6.21: Ausstoßergruppe der 3. Umformstufe (vgl. Bild 6.20)

Mit einer Steckkupplung, bestehend aus einer Nut an der unteren Ausstoßerstirnfläche und einem rechteckigen Schaft auf der oberen Stößelfläche, überträgt der Stößel die axiale Bewegung des Maschinenausstoßers und die durch den in der Schraubnut geführten Bolzen erzwungene Rotation auf den Ausstoßer (Bild 6.21). Der Ausstoßer und der Stößel werden beim Rückhub des Maschinenausstoßers durch die Spiralfeder zurückgestellt.

Das fertig geschmiedete schrägverzahnte Zahnrad wird über den schraubenförmig geführten Ausstoßer aus dem Untergesenk ausgestoßen (Bild 6.21). Damit die Reibkräfte zwischen Matrize und Schmiedeteil so gering wie möglich sind, muss die Bewegungsrichtung senkrecht zum Normalprofil der Verzahnung bzw. parallel zur Zahnflanke verlaufen.

Der Verlauf der Führungsnut, die den Ausstoßer in seine Rotationsbewegung zwingt, wird dazu über die Steigungshöhe h_s bestimmt. Die Steigungshöhe gibt die Höhe eines imaginären Zylinders an, in dem das Zahnrad entlang seiner Verzahnung geführt eine Drehung um 360° vollzieht. Die Steigungshöhe lässt sich nach Bild 6.22 ermitteln. Die Skizze zeigt ein abgewickelt Zahnrad der Breite b und dem Gesamtumfang U dessen Zähne unter dem Schrägungswinkel β verlaufen. Die Steigungshöhe h_s ergibt sich aus der imaginären Breite eines Zahnrades dessen Zähne jeweils 360° des Teilkreises überdecken.

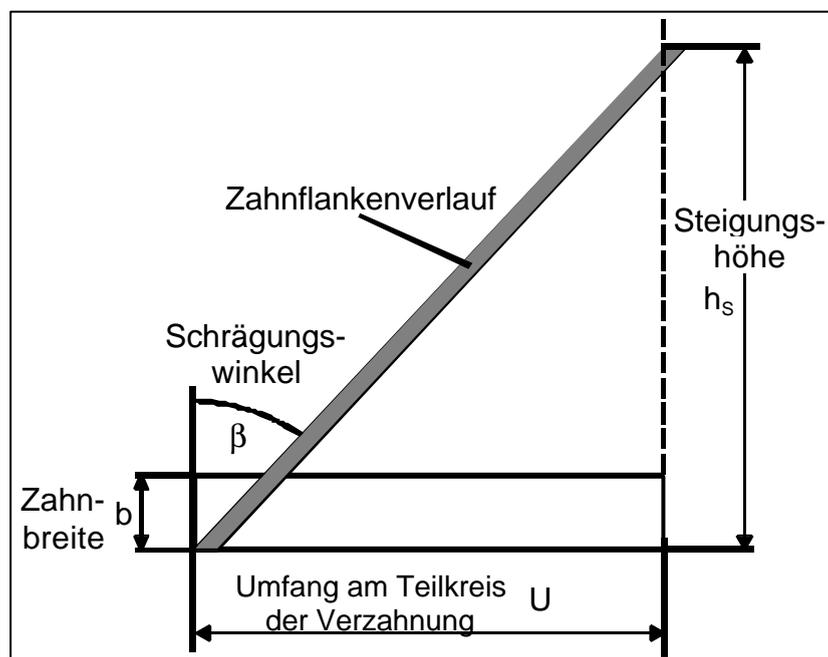


Bild 6.22: Bestimmung der Steigungshöhe der Ausstoßerführung

Für den Schrägungswinkel der Ausstoßerführung ergibt sich folgende Berechnung:

$$\tan \beta = \frac{U}{h_s} \quad (6.1)$$

Mit dem Umfang am Teilkreis

$$U = d \cdot p \quad (6.2)$$

ergibt sich

$$h_s = \frac{d \cdot p}{\tan b} \quad (6.3)$$

Für die Schraubnut der Ausstoßerhülse mit dem mittleren Führungsdurchmesser $d_{mFü}$ folgt daraus für den Schrägungswinkel $b_{Fü}$ der Ausstoßerführung:

$$b_{Fü} = a \tan \left(\frac{d_{mFü} \cdot p}{h_s} \right) \quad (6.4)$$

Für den Ausstoßprozess ist eine Führungsnut mit idealer Steigung günstig, da so weder die linke noch die rechte Flankenseite des Zahnrades durch die Rotation des Ausstoßers belastet wird. Ein nachteiliger Ausstoßer drückt das Zahnrad gegen die ohnehin durch den Ausstoßvorgang belastete Flankenseite. Fertigungstoleranzen sollten daher in Richtung auf einen voreilenden Ausstoßer aus gelegt werden.

6.5.2 Oberwerkzeug

Die obere Gesenkplatte dient zur Aufnahme der oberen Gesenke der drei Stufen und der beiden Führungsbuchsen des Säulenführungsgestells (Bild 6.23).

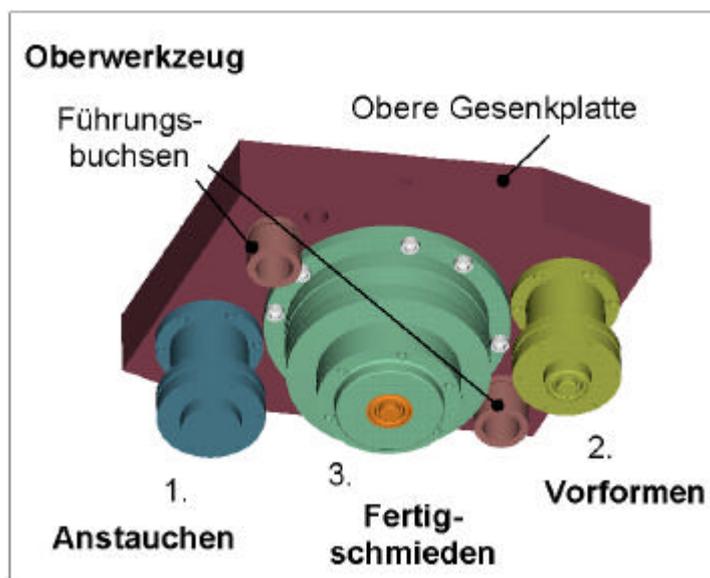


Bild 6.23: Oberwerkzeug mit 3 Umformstufen und Führungsbuchsen zur Aufnahme der Säulen

Oberwerkzeug Stufe 1 und 2

Die Oberwerkzeuge der 1. und 2. Umformstufe befinden sich jeweils außermittig auf einer Diagonalen der oberen Gesenkplatte (vgl. Bild 6.23). In einer flachen Zentrierbohrung sitzt der Distanzzylinder, der die Höhendifferenz zur 3. Stufe ausgleicht.

Über einen zentrierenden Ring werden eine Distanzscheibe und der Stempel auf die untere Zylinderstirnfläche gespannt (Bild 6.24). Die Distanzscheibe ermöglicht den Ausgleich von kleineren Höhendifferenzen der drei Stufen zueinander. Die beiden Baugruppen sind wie die entsprechenden Baugruppen des Unterwerkzeuges gegeneinander austauschbar, so dass die Anordnung der Stufen den jeweiligen Anforderungen der Werkzeugmaschine, des Bedienpersonals oder der Transfereinrichtung angepasst werden kann.

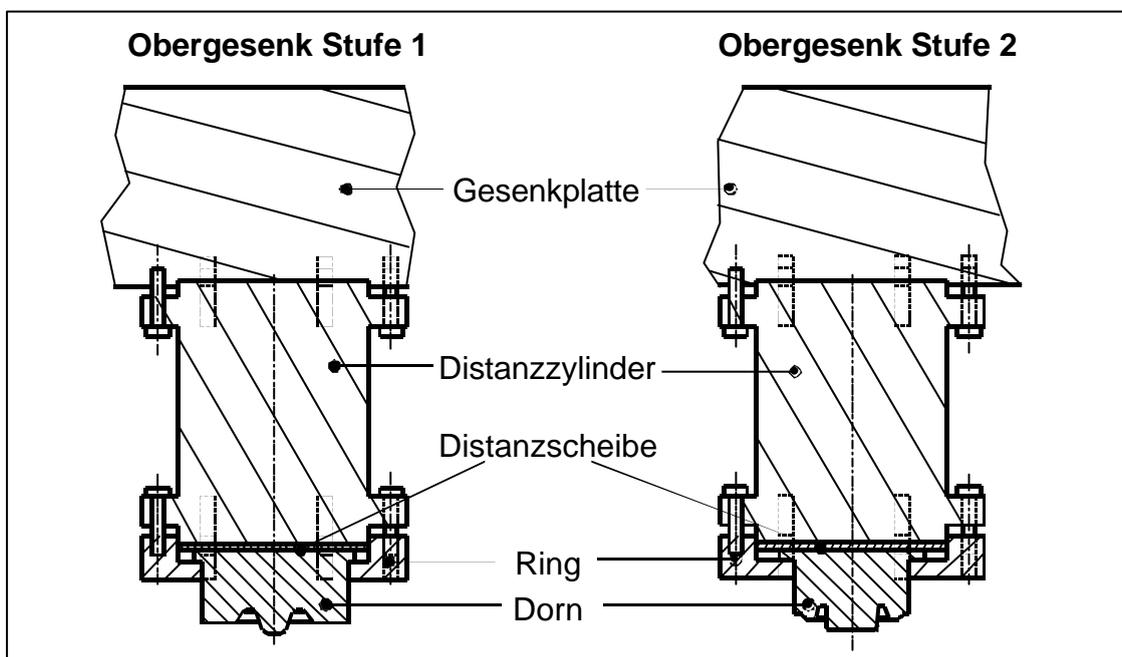


Bild 6.24: Obergesenke der 1. und 2. Umformstufe (vgl. Bild 7.23)

Oberwerkzeug Stufe 3

In einer Bohrung in der Mitte der oberen Gesenkplatte ist ein Kraftmessring eingelassen dessen Kabel durch eine Bohrung zur oberen Fläche der Gesenkplatte und auf dieser durch eine flache Nut zur Seite hinausgeführt wird. Der Dorn, welcher die obere Stirnseite des Schmiedeteils abbildet, wird von unten mit einem Ring über einen Kegelsitz gegen eine Druckplatte und den Kraftmessring gespannt (Bild 6.25).

Auf dem zylindrischen Schaft des Dornfußes wird mit einer Gleitbuchse ein Gleitflansch geführt. Dieser stützt sich über eine Säule aus 6 Tellerfedern an der unteren Fläche des Flanschrings ab. Sechs ineinanderlaufende Rohrsegmente, von denen drei am Gleitflansch und drei am Flanschring verschraubt sind, führen die Tellerfedersäule.

Mit einer Mutter wird der Napfdorn bundzentriert gegen die untere Stirnfläche des Dornfußes gespannt. Die Mutter spannt außerdem über einen Ansatz am Gleitflansch die Tellerfedersäule vor.

Die Schließplatte und eine Distanzplatte werden von unten an den Gleitflansch geschraubt, beide werden vom Dorn durchdrungen und stützen sich an der Federsäule nach oben ab.

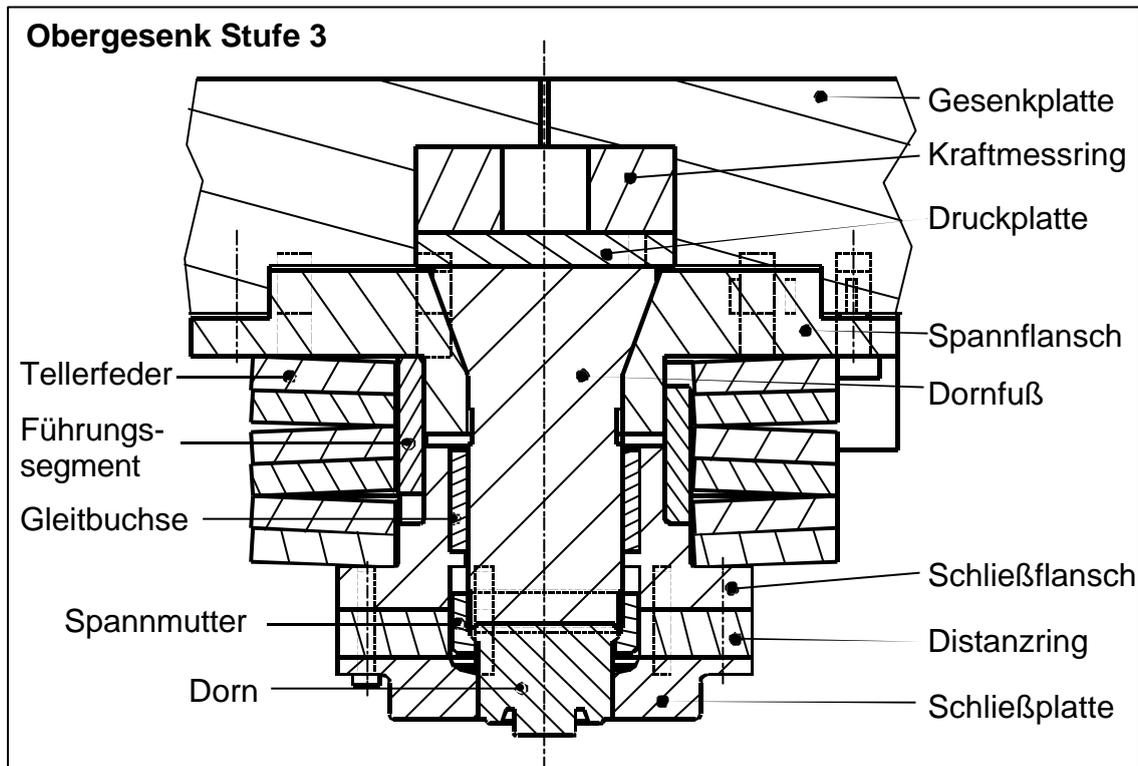


Bild 6.25: Obergesenk der 3. Umformstufe (vgl. Bild 6.23)

Auch diese Baugruppe lässt sich bei eingebautem Werkzeug komplett als Einheit demontieren, so dass sowohl Verschleißteile ausgetauscht, als auch die Schließkraft, mit der die Schließplatte beaufschlagt wird, durch Umschichten der Tellerfedern variiert werden kann.

6.5.3 Modularer Aufbau des Werkzeugsystems

Bild 6.26 zeigt die streng modular gegliederte Hierarchie der Bauteile und Baugruppen im Modellbaum des Werkzeugsystems.

Die Baukastenstruktur besteht aus

- *notwendigen Baugruppen*, die grundsätzlich zur Erfüllung der Gesamtfunktion Schmieden erforderlich sind (Matrize, Gesenkplatte etc.),
- *alternativen Baugruppen*, welche die Auswahl zwischen zwei oder mehreren Elementen gleicher Grundfunktion ermöglichen (z.B. Schließplatte oder Schließbrücke),

- *optionalen Baugruppen*, die nach Bedarf verwendet werden können (z.B. Führungszylinder) oder nur in bestimmten Anwendungsfällen zur Erfüllung der Gesamtfunktion notwendig sind (z.B. Führungsbuchse des Ausstoßers beim Schmieden schrägverzahnter Zahnrädern).

Für die Baugruppe „Schließplatte“ ist in Bild 6.26 die alternative Baugruppe „Schließbrücke“ genannt. Eine solche Schließbrücke wird für das Werkzeug in Kap. 7.3 verwendet.

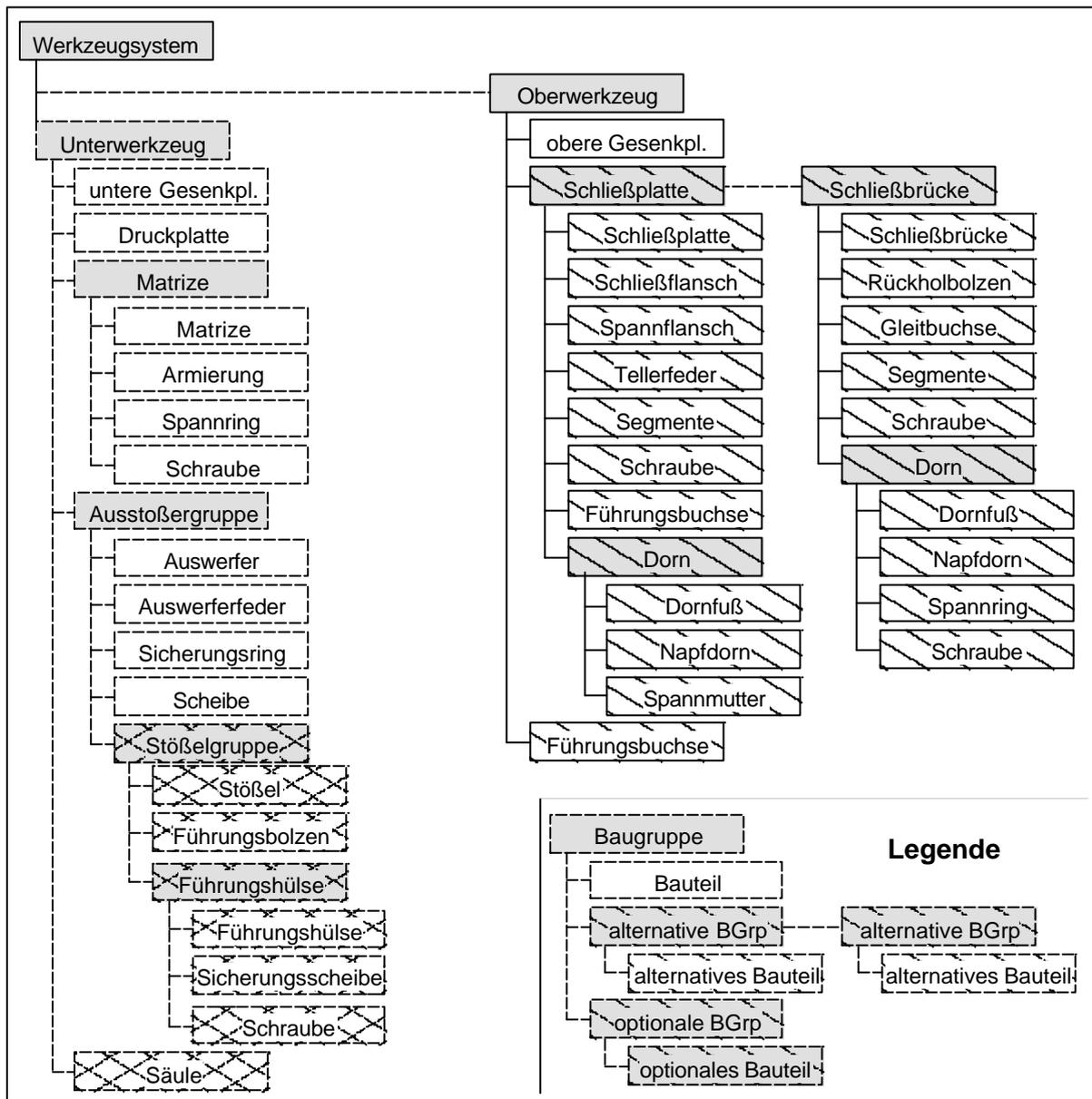


Bild 6.26: Modularer Aufbau des Werkzeugsystems zum Präzisionsschmieden von schrägverzahnten Zahnrädern zur Erreichung möglichst hoher Flexibilität (vgl. Bild 6.27)

Bild 6.27 zeigt für einen Überblick und zur Verdeutlichung der Modularität eine Explosionsdarstellung des gesamten Werkzeugsystems mit allen Baugruppen.

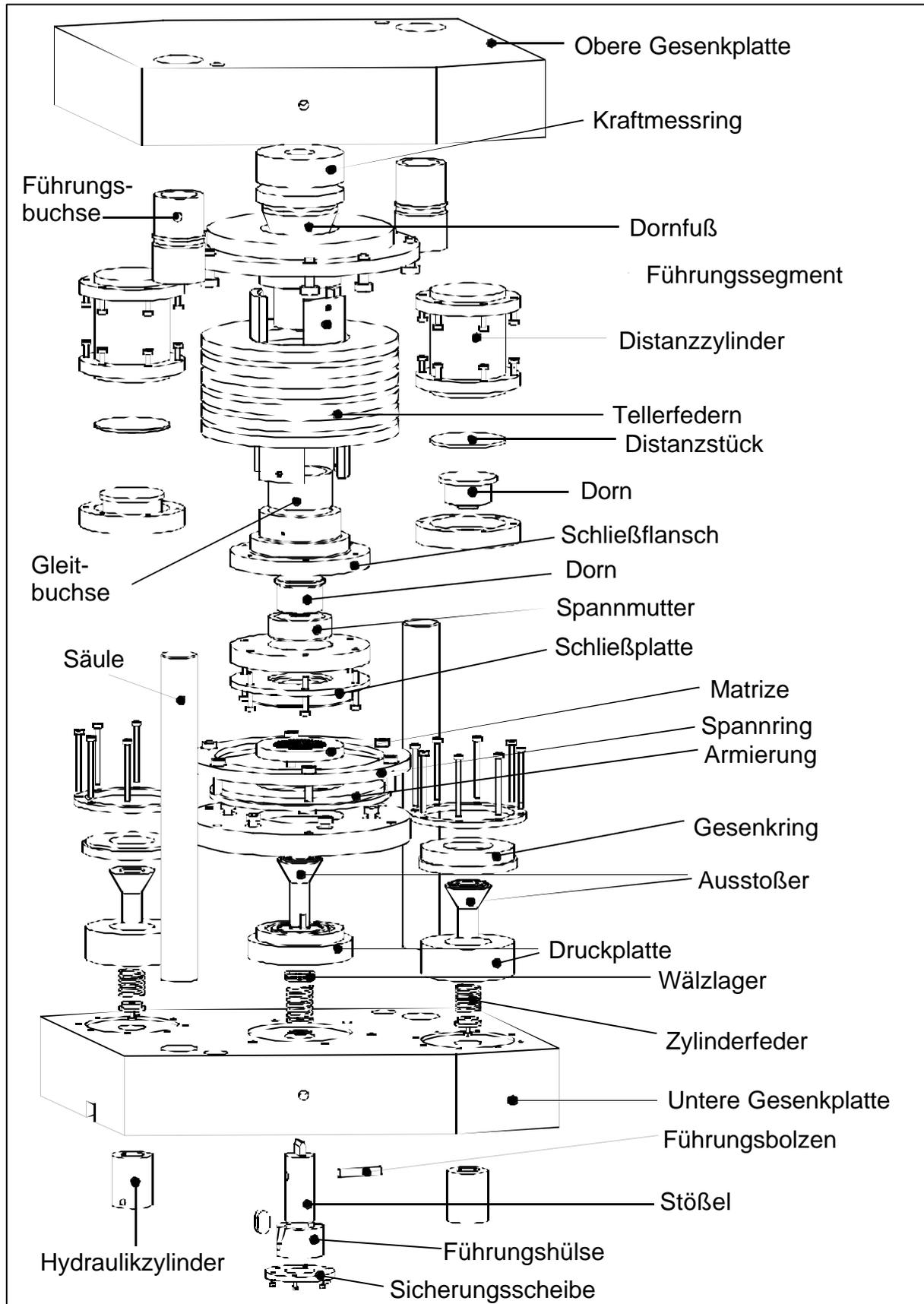


Bild 6.27: Explosionsdarstellung des 3-stufigen Werkzeugsystems mit allen Baugruppen

6.6 Beschreibung des Umformvorgangs

Im folgenden wird der mehrstufige Umformprozess beschrieben, dessen Stadienfolge mit FE-Methoden ausgelegt wurde (vgl. Kap. 6.3).

Das Höhe/Durchmesser-Verhältnis des Rohteils sollte, um eine ausreichende Durchschmiedung zu erreichen bei 1,2 bis 1,8 liegen. Die in diesem Prozess eingesetzten Rohteile haben ein Durchmesser-Höhenverhältnis von 1,6. Gescherte Rohteile sollten, um eine gute Zentrierung im Gesenk zu gewährleisten, ebene und planparallele Stirnflächen aufweisen.

Stufe 1

Das auf 1250°C erwärmte Rohteil wird in das Untergesenk der 1. Stufe eingelegt und über den Außendurchmesser in der gefasten Zentrierbohrung der Stirnfläche des Ausstoßers zentriert (Bild 6.28).

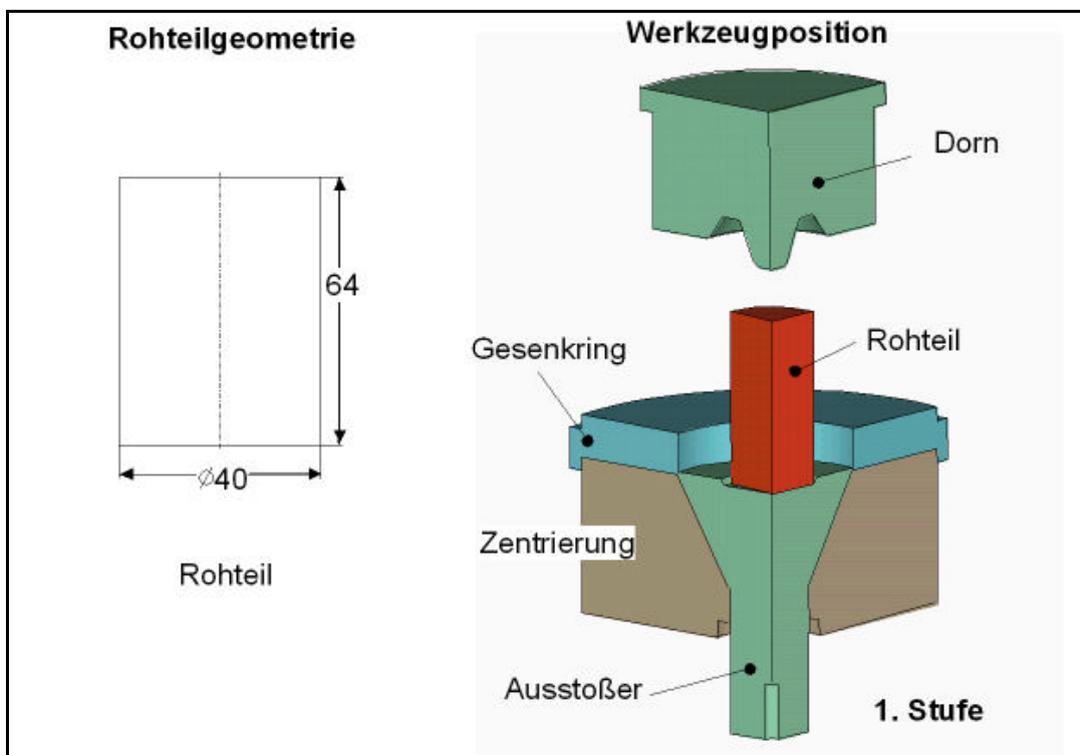


Bild 6.28: Rohteilgeometrie und Positionierung des Rohteils in der 1. Stufe (Anstauchen)

Der Dorn der Vorstufe dringt in das Rohteil ein und formt zunächst den Napfkegel und den Nabenbund vor. Der Dorn fährt soweit, dass das Material sich durch Querfließen an den Gesenkring anlegt und ein definierter Außendurchmesser am Werkstück abgebildet wird (Bild 6.29). Da der Dorn nicht bis auf den Gesenkring fährt, handelt es sich um einen Stauchvorgang im offenen Gesenk. Die Eindringtiefe des Dorns ist so bemessen, dass das Gesenk nicht vollständig ausgefüllt wird. Die korrekte Eindringtiefe des Stempels kann über unterschiedlich dicke Distanzscheiben am Dorn eingestellt werden (vgl. Bild 6.23).

Der Maschinenstößel fährt im unteren Totpunkt gegen Anschlagssäulen und dann zurück in die obere Ausgangslage. Der Ausstoßer der 1. Stufe wird ausgelöst und stößt das Werkstück nach oben aus dem Gesenk. Dieses wird nun vom Ausstoßer in das Gesenk der 2. Umformstufe transferiert.

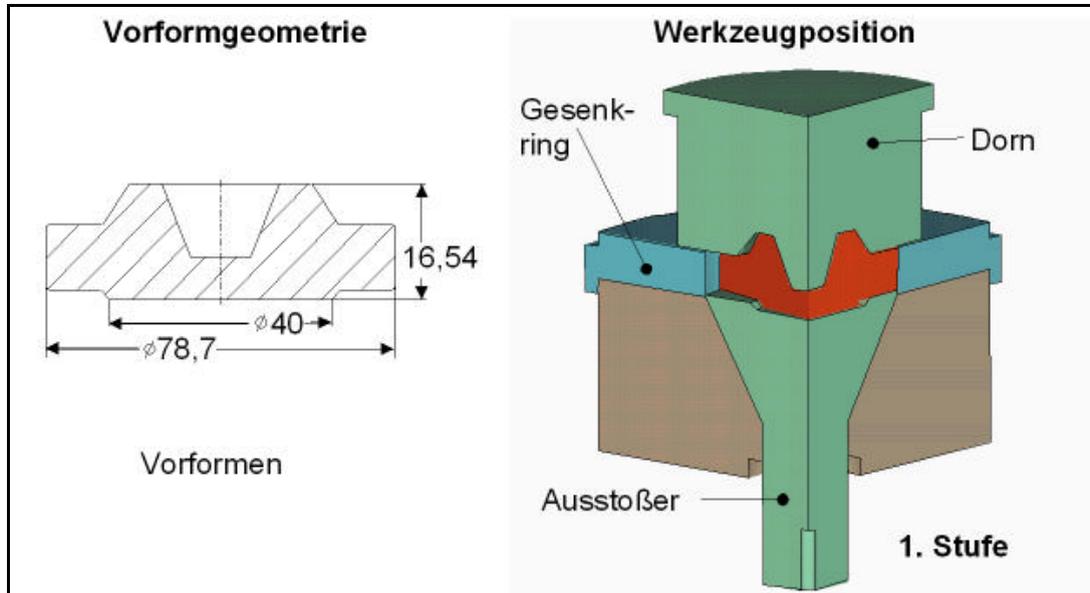


Bild 6.29: Vorformgeometrie und WZ-Position am Ende der 1. Stufe (Anstauchen)

Nach dem Lösen des Ausstoßers drückt die Zylinderfeder den Hydraulikzylinder in die Ausgangsstellung und den Ausstoßerkegel in den Kegelsitz der Druckplatte zurück.

Stufe 2

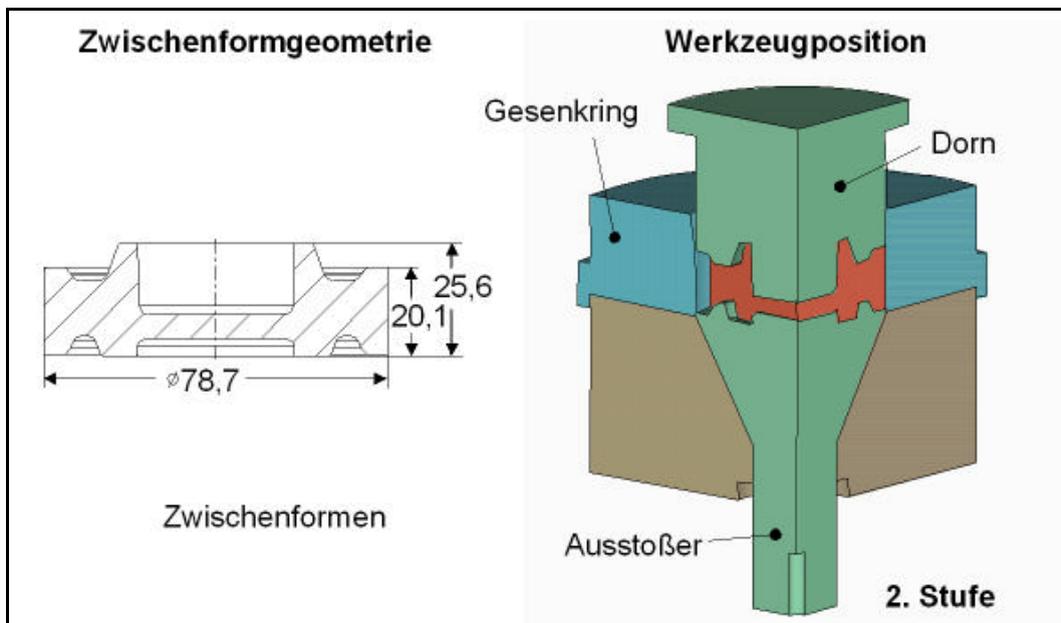


Bild 6.30: Vorformgeometrie und WZ-Position am Ende der 2. Stufe (Vorschmieden)

Bei Auslösung des nächsten Maschinenhubes fährt der Maschinenstößel herunter und der Stempel der 2. Stufe dringt in den Gesenkring ein und staucht das Werkstück.

Durch Quer- und Rückwärtsfließen wird die Gravur gefüllt und die Stirnflächenkonturen am Schmiedeteil abgebildet (Bild 6.30).

Der Ausstoßer der 2. Stufe wird über den Hydraulikzylinder betätigt und drückt das Schmiedeteil heraus. Es erfolgt der Werkstücktransfer von Stufe 2 in Stufe 3. Beim Einlegen in Stufe 3 zentriert sich das Werkstück über die bereits geformte untere Stirnfläche automatisch im Werkzeug. Nach erfolgtem Ausstoßen und Transfer drückt die Zylinderfeder den nun drucklosen Hydraulikzylinder und Ausstoßer in die Ausgangsstellung zurück.

Stufe 3

Beim Auslösen des dritten Arbeitshubes fährt der Maschinenstößel herunter und die Schließplatte setzt auf der Matrize im Untergesenk auf. Die Federsäule wird weiter komprimiert und die Schließkraft steigt über dem Federweg nahezu linear an. Gleichzeitig dringt der Dorn durch die Bohrung in der Schließplatte und leitet die Umformkraft in das Werkstück ein. Das Material füllt daraufhin querfließend die Matrizengravur (Bild 6.31). Die Eindringtiefe des Dorns wird dadurch begrenzt, dass der Maschinenstößel von oben gegen die Anschlagssäulen fährt. Nach erfolgter Umformung wird dieser in den oberen Totpunkt zurückgedrückt.

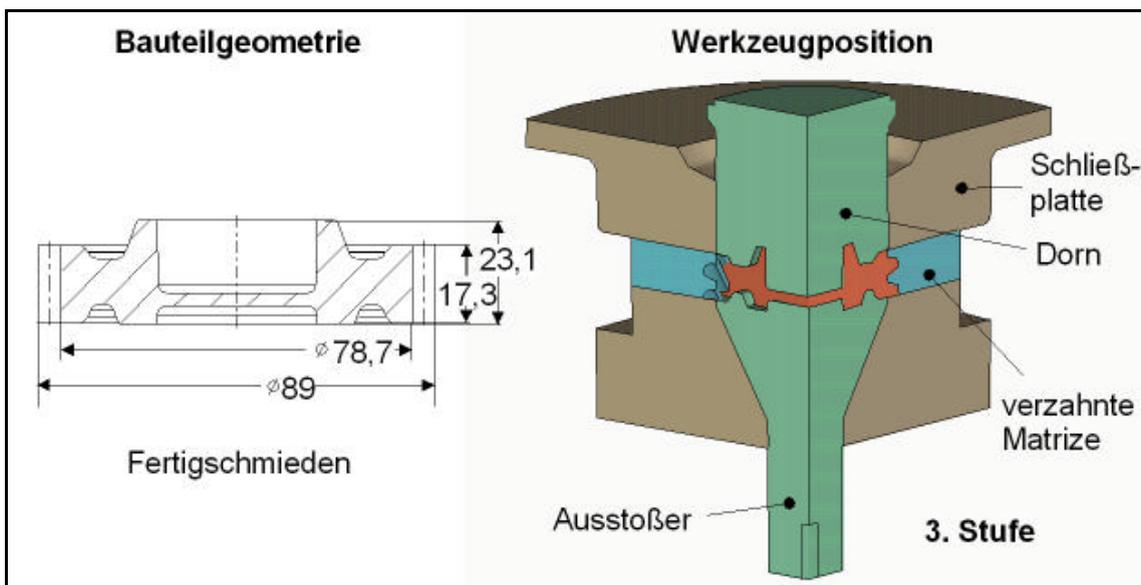


Bild 6.31: Bauteilgeometrie und WZ-Position am Ende der 3. Stufe (Fertigschmieden)

Über den Ausstoßerstößel, der in der schraubenförmigen Nut geführt wird, wird eine schraubenförmige Bewegung in den Ausstoßer der 3. Stufe eingeleitet (vgl. Bild 6.21). Der Ausstoßer dreht das schrägverzahnte Werkstück nach oben aus der Matrize heraus. Das fertige Schmiedeteil kann vom Ausstoßer entnommen werden. Der maschinenseitige Ausstoßer wird zurückgefahren und die Zylinderfeder drückt den Ausstoßer der 3. Stufe in die Ausgangsposition.

6.7 Prozessuntersuchung und Bauteilqualität

Um die Anforderungen an den mehrstufigen Präzisionsschmiedeprozess zu definieren, wurden experimentelle Untersuchungen durchgeführt. Hierbei wurden zentrale Schmiede-Prozessparameter variiert (Umformtemperatur, Rohteilmasse), um Anforderungen zu definieren und optimale Einstellungen des Schmiedeprozesses sowie der Bauteilqualität zu ermitteln. Des Weiteren wird der Einfluss der Verzahnung auf Umform- und Ausstoßerkraft analysiert.

Zur Untersuchung des Prozessverhaltens bei variierenden Eingangsgrößen wurde als Werkstoff für die Rohteile der Einsatzstahl 1.7131 (16MnCr5) verwendet. Dieser Werkstoff kommt häufig bei Zahnrädern zum Einsatz. Die Rohteile wurden in einem Kammerofen auf die Schmiedetemperatur erwärmt. Der Transfer der Schmiedeteile wurde manuell durchgeführt. Die Fertigteile wurden nach dem Ausstoßen aus der 3. Stufe in Sand abgekühlt, da hierdurch gleichmäßige Abkühlbedingungen und eine langsame Abkühlgeschwindigkeit erreicht werden. Zudem wird eine weitere Verzunderung der Teile nach dem Schmieden weitgehend verhindert. Alle Gesenke der 3 Umformstufen wurden mit Delta F 31 (Firma Acheson) geschmiert, das Gesenk der 3. Umformstufe wurde zusätzlich mit Wasser gekühlt. Als Umformmaschine wurde eine Kupplungsspindelpresse der Firma Siempelkamp verwendet (zur Spezifikation dieser Presse siehe Kap. 6.3, vgl. Bild 6.6).

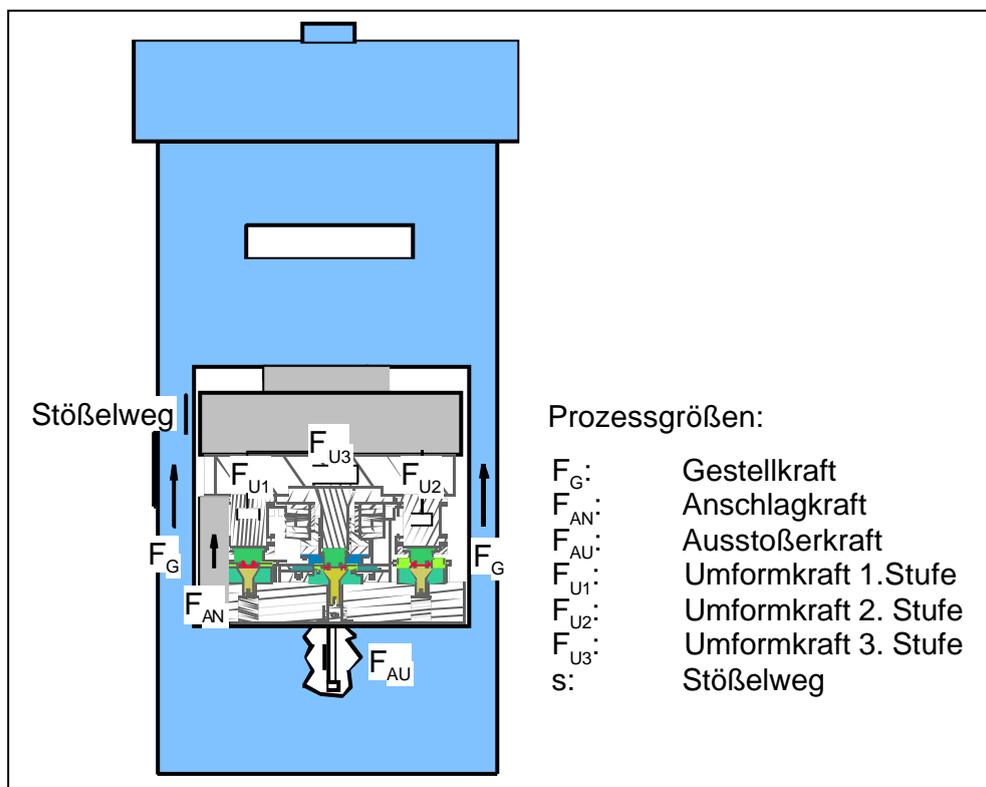


Bild 6.32: Skizze der Sensorapplikation an Werkzeug und Umformmaschine (nicht maßstäblich)

Zur Analyse des Umformprozesses wurde das Werkzeug und die Umformmaschine mit Sensoren versehen, um folgende Prozessgrößen aufnehmen zu können: Gestellkraft (Dehnungsmessstreifen, DMS), Anschlagkraft (DMS), Umformkraft in den Stufen 1, 2 und 3 (DMS), Ausstoßkraft (über Hydraulikdruck im maschinenseitigen Ausstoßer) und Stößelweg (induktiver Wegaufnehmer) (Bild 6.32).

Druckberührzeit in den Umformstufen

Zentrale Forderung an die Wirtschaftlichkeit des Präzisionsschmiedeprozesses ist eine hohe Lebensdauer der Werkzeuge. Der 3-stufige Umformprozess sollte aufgrund der Stadienfolge entsprechend seiner Konzeption (Kap. 6.2) auf minimalen Verschleiß hin ausgelegt sein. Der Verschleiß ist in entscheidendem Maße von der Temperaturbelastung der Werkzeuge abhängig, welche unmittelbar mit der Druckberührzeit zwischen Werkzeug und Werkstück korreliert. Die Druckberührzeit ist die Zeit, während der die Gesenke unter Wirkung der Umformkraft mit dem Schmiedestück in Berührung sind.

Durch eine weitgehende Vorformung des Bauteils in der zweiten Umformstufe wird eine starke Reduzierung der Druckberührzeit in der dritten Stufe und eine Minimierung der Fließwege erreicht, was zu einer geringeren Belastung des Gesenkes beim Schmieden der Verzahnung führt. Sie beträgt in Stufe 1: 0,24 s, in Stufe 2: 0,11 s und in Stufe 3: 0,05 s (Bild 6.33 – 6.35).

Einfluss der Verzahnung auf die Umformkräfte

Die Bilder 6.33 – 6.35 zeigen die gemessenen Umformkraftverläufe und den Stößelweg über der Zeit in den Umformstufen 1 bis 3.

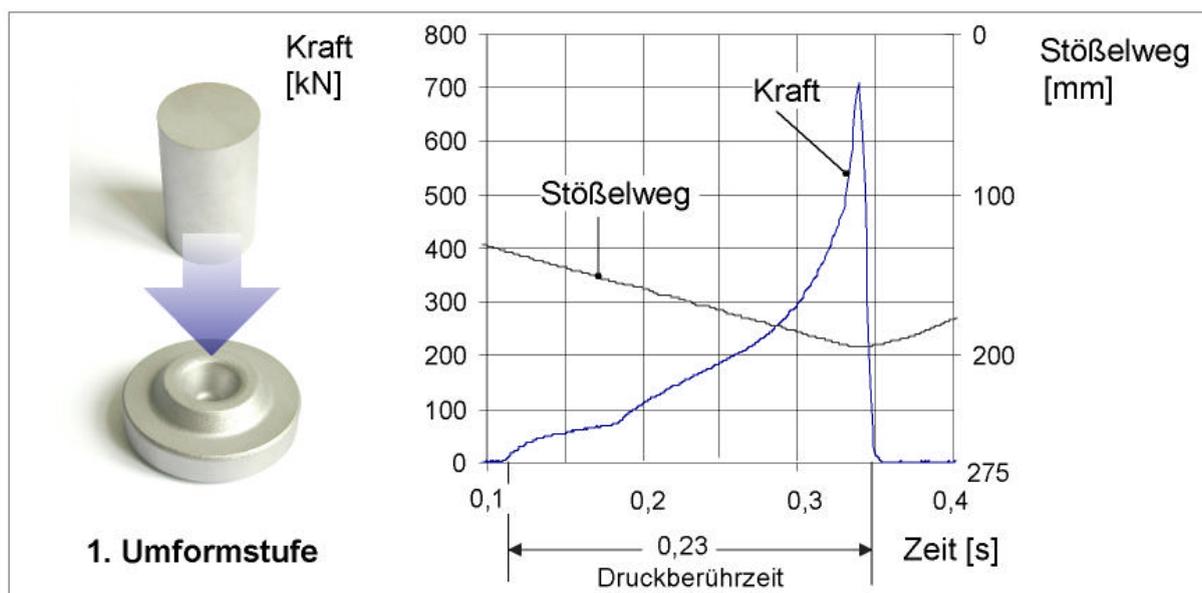


Bild 6.33: Umformkraft in der 1. Stufe, Anstauchen

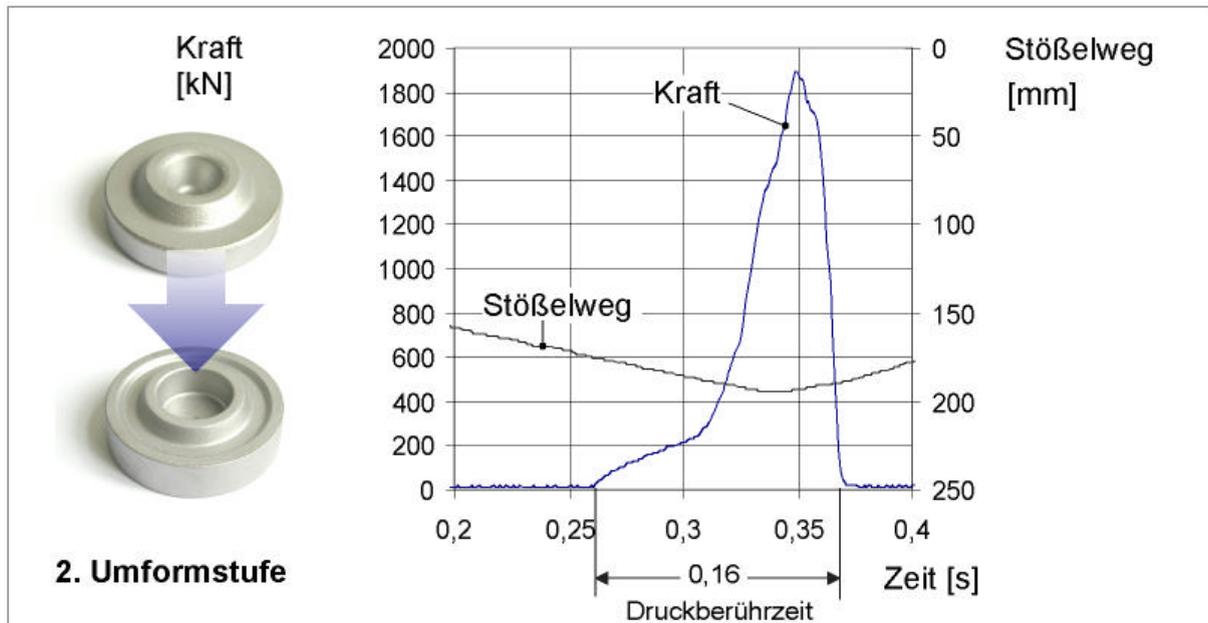


Bild 6.34: Umformkraft in der 2. Stufe, Vorformen

Zur Untersuchung des Einflusses der Verzahnungsgeometrie auf die Umformkraft wurden die Verzahnungsgeometrien aus Tabelle 5.1, 5.2 (vgl. Bild 5.5) geschmiedet. Die umformtechnisch optimierte Verzahnung wird mit der Referenzverzahnung verglichen. Für die Umformstufen 1 und 2 ergeben sich für beide Verzahnungen aufgrund der ähnlichen Vor- und Zwischenform identische Verläufe. Die Geometrie der Verzahnung hat aber bei der Umformung in der dritten Stufe einen erheblichen Einfluss auf die Umformkraft. In Bild 6.35 sind für beide Verzahnungen (RV/UV) die Umformkräfte und der Stößelweg über der Zeit dargestellt.

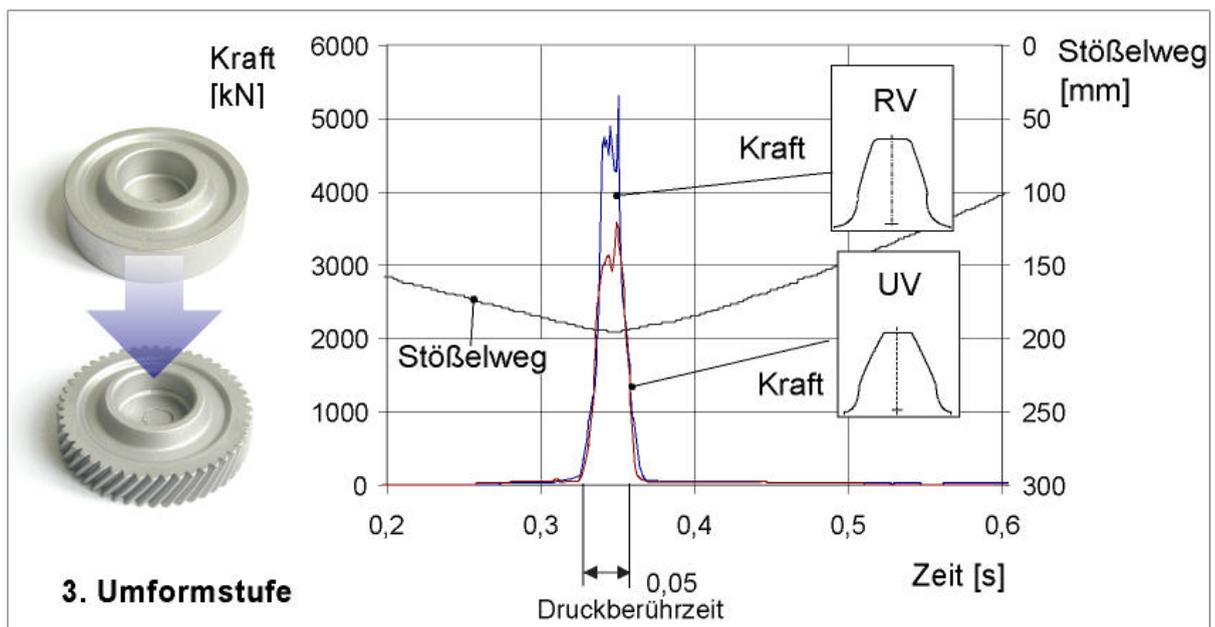


Bild 6.35: Umformkraft in der 3. Stufe (Schmieden der Verzahnung) für Rad mit Referenzverzahnung (RV) und umformtechnischer Verzahnung, (UV)

Für die umformtechnisch optimierte Verzahnung ist die maximale Umformkraft durch einen größeren Normaleingriffswinkel ($\alpha_{nUV}=24^\circ$) und eine geringere Zahnhöhe geringer als bei der Hochverzahnung ($\alpha_{nRV}=16^\circ$).

Da die Lebensdauer der formgebenden Elemente eines Präzisionsschmiedeteils von der mechanischen Belastung abhängt, ist mit der Verringerung der mechanischen Belastung der Gesenke ein geringerer Verschleiß zu erwarten.

Der Werkzeug-Innendruck p_i kann für das Umformen im geschlossenen Gesenk nach /VDIR86/ folgendermaßen berechnet werden:

$$p_i = \frac{F_U}{A_{ST}} - k_f \quad (6.5)$$

Hierbei ist k_f die Fließspannung des Werkstückwerkstoffes, F_U die Umformkraft und A_{ST} die Fläche des umformenden Stempels. Es ergeben sich entsprechend der unterschiedlichen Umformkräfte abweichende maximale Werkzeuginnendrucke für die beiden Verzahnungsgeometrien (RV/UV).

Im Vergleich zwischen den mit Hilfe der FEM berechneten Umformkräften aus Kap. 6.4 und den gemessenen ergeben sich Abweichungen. Diese beruhen darauf, dass in der FEM-Simulation mit fast vollständig ausgeformten Bauteilen gerechnet wird, eine solche Formfüllung wird in der Praxis nicht erreicht; daher liegen die berechneten maximalen Umformkräfte im allgemeinen immer über den gemessenen. Eine vollständige Formfüllung der Gravur ist auch aus Gründen der Verschleißreduzierung nicht anzustreben.

Einfluss der Verzahnung auf die Ausstoßkraft

Bei den Ausstoßkräften der Umformstufen wird nur die der dritten Stufe des Verzahnungsschmiedens betrachtet. Die Ausstoßkraft in der dritten Stufe ist von Interesse, da zum einen hohe Ausstoßkräfte die Verzahnung des Schmiedeteils verformen und zum anderen die verzahnte Matrize schädigen können.

Die Höhe der Ausstoßkraft ist ein Maß für die Belastung der Matrize bei der Entformung des Schmiedeteils. Die Ausstoßkraft wird über den Arbeitsdruck im Hydrauliksystem des maschinenseitigen Ausstoßers bestimmt. Mit ansteigendem Öldruck wird der Ausstoßer der Umformmaschine angehoben bis er den Ausstoßer des Werkzeugs erreicht. Der Öldruck steigt nun soweit an, bis sich das Schmiedeteil aus der Gravur löst. Das Ausstoßen des Zahnrades beginnt.

Die Ausstoßkraft entsteht durch Reibung der Oberfläche der Verzahnung des Rades mit der Matrize. Aus dem Verlauf der Ausstoßkraft (Bild 6.36) ist zu erkennen, dass der Ausstoßer erst eine gewisse Kraft zur Verfügung stellen muss, um das Zahnrad aus der Matrize beim Übergang von Haft- zu Gleitreibung zu lösen, nachfolgend verläuft das Ausstoßen mit abnehmender Kraft.

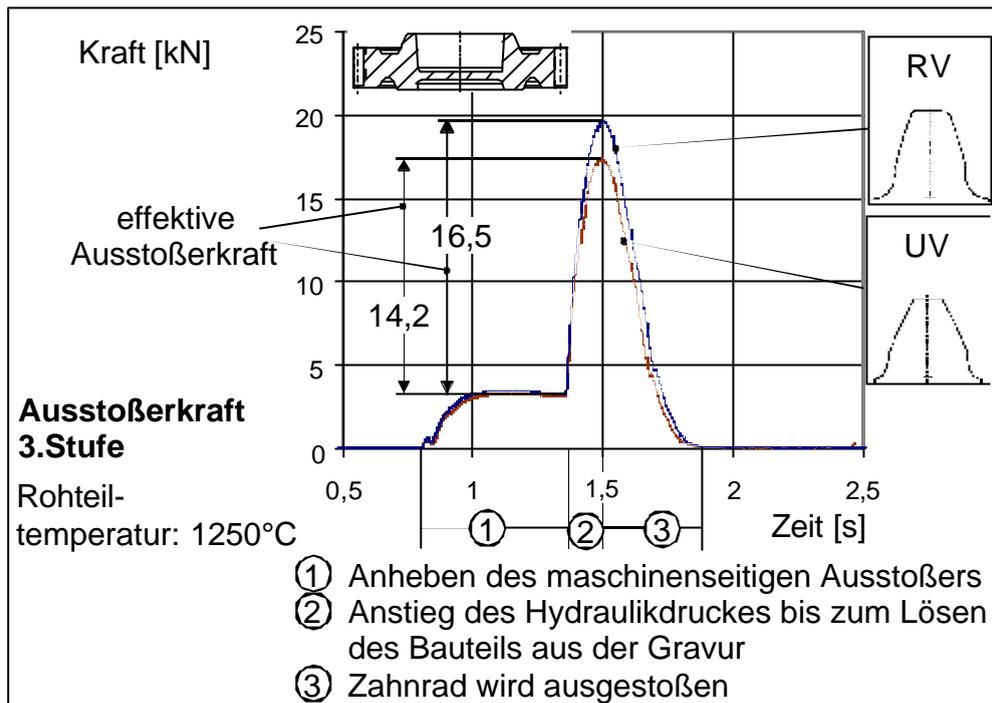


Bild 6.36: Ausstoßerkraft in der 3. Stufe für Rad mit Referenzverzahnung (RV) und umformtechnisch optimierter Verzahnung (UV)

Die bestimmende Größe für die Ausstoßerkraft ist die Kontaktspannung zwischen Werkstück und Werkzeug nach der Umformung. Die Matrize dehnt sich während der Umformung aufgrund des Werkzeuginnendruckes elastisch aus. Bei Entlastung durch den umformenden Dorn wird die Entspannung der Matrize durch das Schmiedeteil begrenzt. Die Matrize formt somit das Zahnrad durch die elastische Rückfederung plastisch um. Unabhängig von der Größe der Matrizenausdehnung ist diese Umformung abgeschlossen, sobald die Spannung in der Matrize den Wert der Fließspannung des Zahnradwerkstoffes für diesen Umformprozess erreicht hat. Die Fließspannung des Zahnradwerkstoffes bildet die Kontaktspannung zwischen Werkstück und Werkzeug nach der Umformung. Nach /Sade92/ kann die Ausstoßerkraft mit

$$F_A = \frac{m \cdot a \cdot k}{\cos \beta} \cdot A_w \quad (6.6)$$

berechnet werden. Hierbei ist m die Reibungszahl, a ist ein Faktor der den Anteil der theoretischen möglichen Kontaktfläche zur wahren Kontaktfläche angibt, k die maximale Schubspannung des Zahnradwerkstoffes /West96/ und β der Schrägungswinkel des Zahnrades. Die maximale Schubspannung t_{max} des Zahnradwerkstoffes kann nach Huber-v. Mises-Hencky mit

$$t_{max} = \frac{k_f}{\sqrt{3}} \quad (6.7)$$

berechnet werden /Kopp98/.

Bei der Berechnung nach Gleichung 6.6 muss beachtet werden, dass durch die Schrumpfung des Schmiedeteils in der Matrize nur noch ein Teil der Verzahnung des

Zahnradkontakt mit der Matrize hat. Zudem wird die Verzahnung im Schmiedeprozess nie vollständig gefüllt.

Bewertung von Prozess und Bauteilgrößen

Vor dem Hintergrund, dass nach dem Präzisionsschmiedeprozess lediglich eine Hartfeinbearbeitung durchgeführt werden soll, muss die Wirkung verschiedener Einflussgrößen auf den Schmiedeprozess und die Qualität der Zahnräder bekannt sein, um die erforderlichen Toleranzen einzuhalten.

Auch die auftretende Werkzeugbelastung im Prozess ist von Interesse, da hierüber die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens in starkem Maße beeinflusst wird. Über die Umformkraft kann auf den im Gesenk wirkenden Innendruck geschlossen werden. Sie gibt einen Hinweis über die Belastung des Werkzeuges. Die Ausstoßkraft gibt die Belastung der verzahnten Matrize beim Ausstoßvorgang an.

Variiert wurden die Prozessgrößen Rohteilmasse (-2%, $\pm 0\%$) und Rohteiltemperatur (1180°C, 1250°C). Deren Einfluss auf Prozess- und Bauteilgrößen wurde untersucht.

Bei idealen Umform- und Ausstoßbedingungen (Schmierung, Positionierung des Rohteils, ideale Maschine, idealer Ausstoßer) beeinflussen Stößelgeschwindigkeit, Rohteiltemperatur und Rohteilmasse lediglich das Profil der Verzahnung, nicht aber deren Teilung. Deshalb werden im folgenden lediglich die Flankenabweichung der Verzahnung betrachtet. Die Messung der Abweichungen erfolgte auf einem 3D-Koordinatenmessgerät.

Als Bauteilgrößen wurde die Formfüllung ($b_{\text{ist}}/b_{\text{soll}}$) der Laufverzahnung, Profil-Gesamtabweichung F_{α} , Profil-Winkelabweichung $f_{h\alpha}$, Profil-Formabweichung $f_{f\alpha}$, Flankenlinien-Gesamtabweichung F_{β} , Flankenlinien-Winkelabweichung $f_{h\beta}$, Flankenlinien-Formabweichung $f_{f\beta}$ und die Stirnzahndicke s_t aufgenommen. Die Flankenlinien-Winkelabweichung kann in die entsprechende Schrägungswinkelabweichung umgerechnet werden.

Flankenabweichungen werden am Stirnrad als Profilabweichungen in der Stirnschnittebene senkrecht zur Verzahnungsachse oder als Flankenlinienabweichungen auf dem Teilzylinder der Verzahnung bestimmt. Bild 6.37 stellt ein Prüfbild der Profil- und Flankenlinienabweichung dar.

Die Stirnzahndicke s_t ist die Länge des Teilkreisbogens zwischen den Flanken eines Zahnes. Die Abweichung der Zahndicke wird aus der Lageabweichung zweier gegensinniger Zahnflanken zueinander bestimmt.

Zur Definition der Abweichungsgrößen sei auf die DIN 3960 verwiesen.

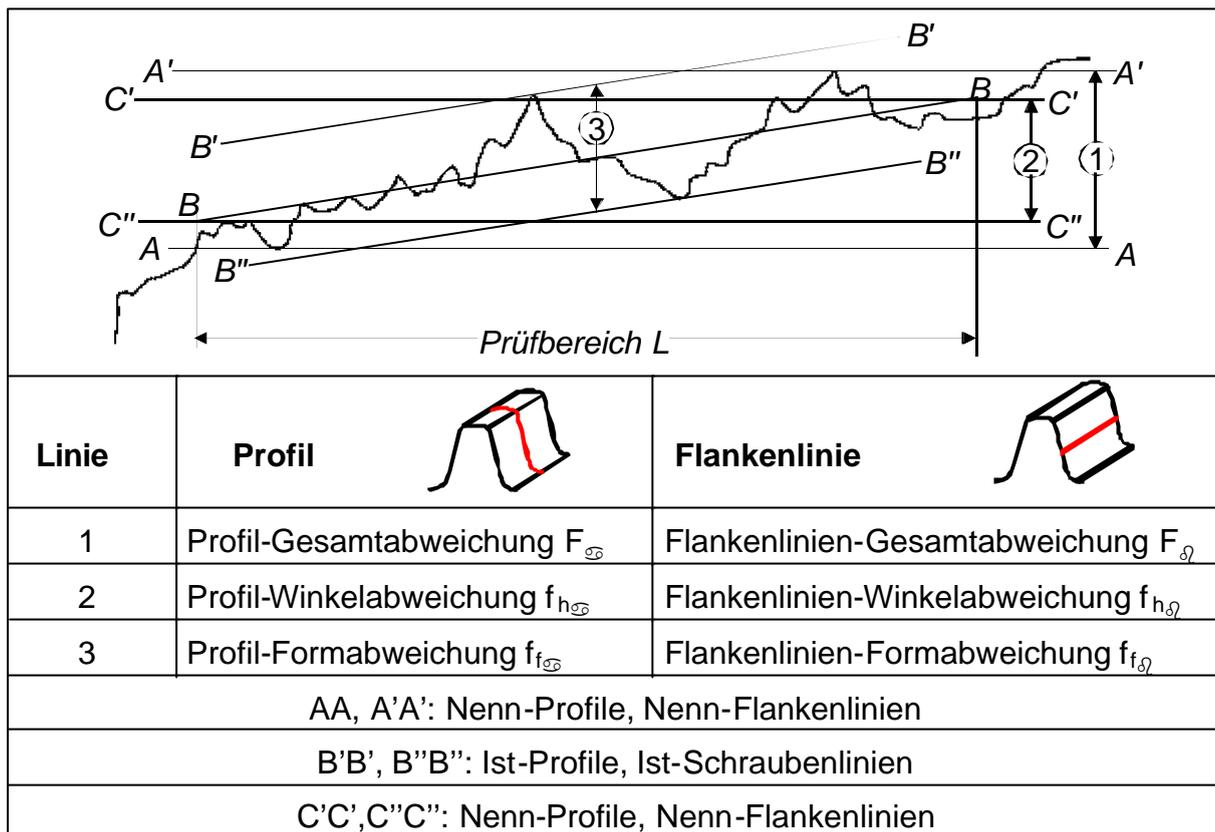


Bild 6.37: Bestimmung der Flankenabweichungen einer Stirnradverzahnung am Prüfbild (DIN 3960)

Die Formfüllung der Laufverzahnung wird als das Verhältnis der gefüllten Zahnbreite zur Sollzahnbreite definiert (Bild 6.38).

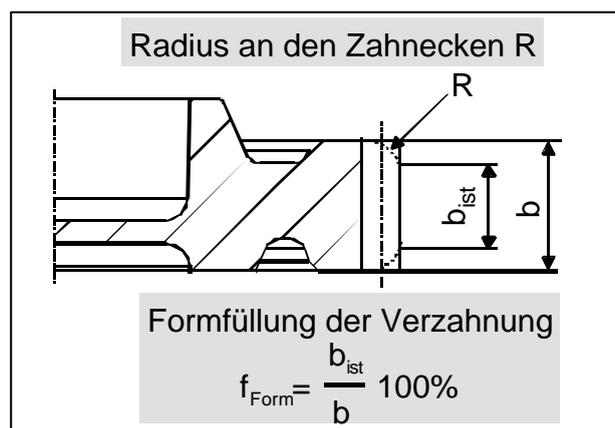


Bild 6.38: Definition der Formfüllung der Verzahnung und des Radius an den Zahnecken am präzisionsgeschmiedeten Rad, nach /Bohn99b/

Jede Versuchseinstellung wurde zur statistischen Absicherung fünfmal wiederholt. Um die Ergebnisse aus den Untersuchungen nutzbar zu machen, wurden diese linearisiert und in Diagrammen dargestellt. Auf diese Weise kann der Toleranzbereich der Eingangsgrößen leicht visualisiert werden.

Einfluss der Rohteilmasse

Als Rohteile für den betrachteten Präzisionsschmiedeprozess können gescherte oder im Paket gesägte Rohteile zum Einsatz kommen. Masseschwankungen der Rohteile können durch Abweichungen im Stangendurchmesser oder durch Ungenauigkeiten des Trennverfahrens entstehen. Beim Schmieden mit Grat kann überschüssiges Material in diesen entweichen, beim Schmieden im geschlossenen Gesenk ist dies nicht möglich. Ist das Rohteilvolumen genau auf das Gesenkvolumen angepasst, so ergeben sich beim Schmieden ohne Grat geringere Kräfte als beim Schmieden mit Grat.

Zur Untersuchung des Einflusses schwankender Rohteilmassen wurden diese gezielt von -2% bis 0% variiert. Bei heutigen Scheranlagen werden Volumengenauigkeiten der Rohteile für das Präzisionsschmieden von $60,5\%$ erreicht. /Gall93/

Die Untersuchungen wurden an dem Zahnrad mit umformtechnisch optimierter Verzahnung (UV, vgl. Bild 6.1) durchgeführt.

In Bild 6.39 ist der Anstieg der Umformkraft in Abhängigkeit von der Rohteilmasse zu erkennen. Eine Verringerung der Rohteilmasse um 2% bedeutet eine Reduzierung der Umformkraft um ca. 8% . Dies ist darin begründet, dass entsprechend weniger Werkstoff in die Verzahnung fließt und somit weniger Umformenergie benötigt wird. Somit wird mit abnehmender Rohteilmasse das Gesenk weniger stark belastet.

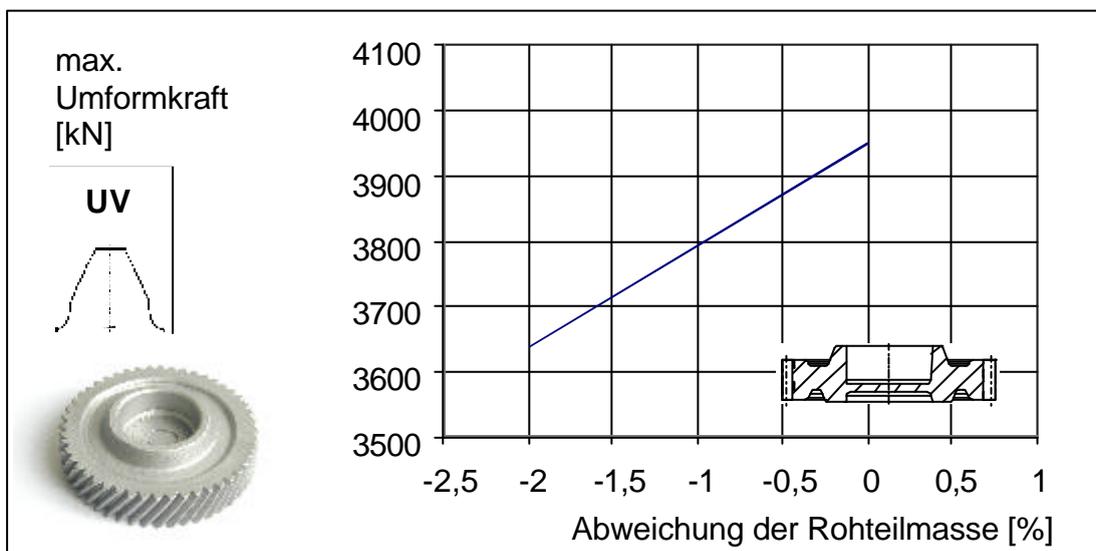


Bild 6.39: Einfluss von Masseschwankungen auf die maximale Umformkraft bei umformtechnisch optimierter Verzahnung in der 3. Umformstufe

Die Rohteilmasse nimmt auch Einfluss auf die Ausstoßkraft, da sie zu einer unterschiedlich starken Formfüllung der Verzahnung führt. Bei reduzierter Rohteilmasse liegt somit eine kleinere Reibfläche zwischen Werkstück und verzahnter Matrize vor, die Ausstoßkraft und Rohteilmasse sind direkt proportional (Bild 6.40).

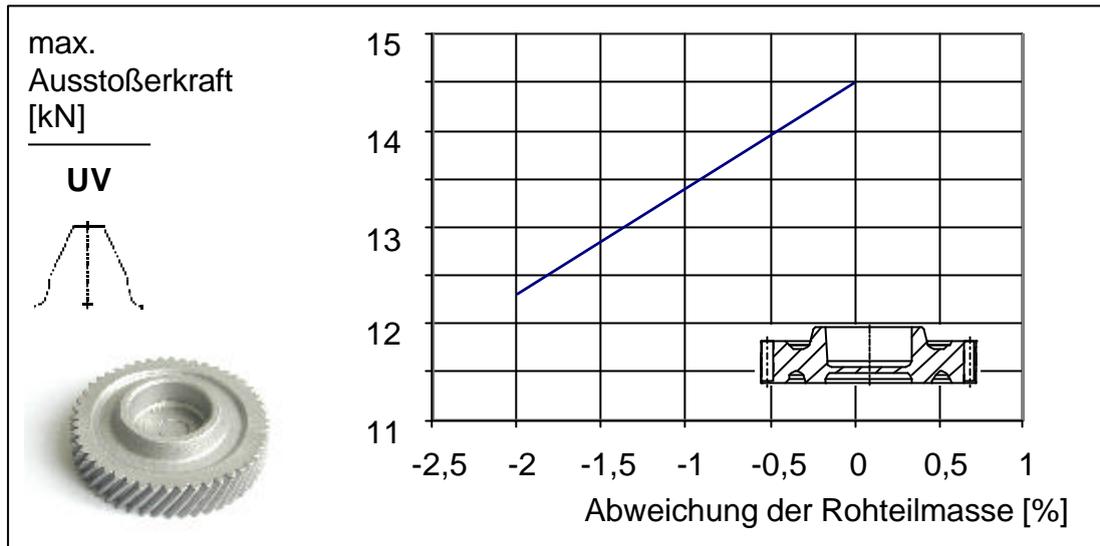


Bild 6.40: Einfluss von Masseschwankungen auf die maximale Ausstoßkraft bei umformtechnisch optimierter Verzahnung in der 3. Umformstufe

An den Ecken der Laufverzahnung wird ein Radius, der maximal die Größe des Normalmoduls erreicht, toleriert ($R \leq m_n$). Sogar bei einer Rohteilmasse von -2,0% bleibt der Radius an den Zahnecken kleiner als der maximal tolerierbare Radius (Bild 6.41).

Eine leicht zu hohe Rohteilmasse führt zu einer Vergrößerung der Grundkörperhöhe des Zahnrades. Der Dorn, der diesen Bereich abbildet und die Umformkraft aufbringt, ist das Element der formgebenden Teile des Werkzeuges, das die größten Dehnungen aufweist. Die stirnseitigen Aufmaße für die Hartfeinbearbeitung korrelieren also stark mit der Genauigkeit der Rohteilmasse.

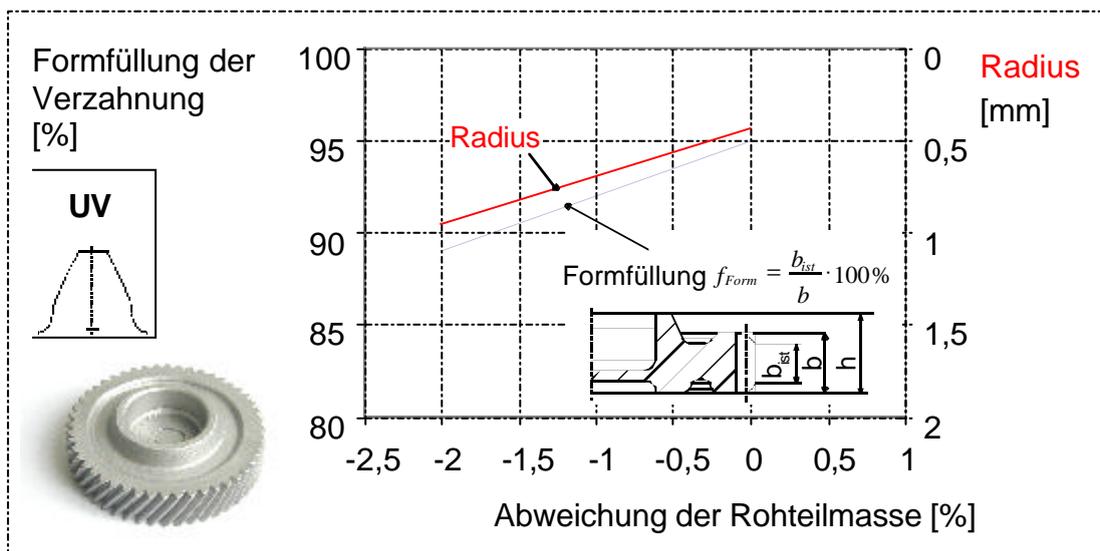


Bild 6.41: Einfluss von Masseschwankungen auf den Radius der Zahnecken und die Formfüllung der Verzahnung in der 3. Umformstufe

Wird die Rohteilmasse weiter erhöht, so kann das zum Bruch des Werkzeuges führen. Besonders gefährdet ist der obere Bereich der verzahnten Matrize, da überschüssiges

Material zwischen diese und die Schließplatte fließt und bei zunehmender Schließkraft auf die Zähne der Matrize gedrückt wird.

Die zum Ausstoßen eines Zahnrades benötigte Kraft ist direkt zum Schrumpfungsbetrag des Schmiedestückes proportional.

Neben der Masse der Rohteile hat auch die Geometrie der Rohteile Einfluss auf das Schmiedeergebnis. Bei dem zylindrischen Ausgangsmaterial sind parallele Stirnflächen unbedingt notwendig, andernfalls kann das Gesenk in der 2. Umformstufe einseitig überfließen und die Vorform nicht mehr in die 3. Umformstufe eingelegt werden.

Einfluss der Rohteiltemperatur

Eine genaue, nicht schwankende Rohteiltemperatur lässt sich schwierig realisieren. Als Störgrößen treten eine variierende Temperatur des Erwärmungsaggregates und vor allem unterschiedliche Transferzeiten auf. Die Schrumpfung des Schmiedefertigteils nach der Entnahme aus dem Gesenk und damit die Genauigkeit der Endgeometrie wird von der Rohteiltemperatur beeinflusst. Zur Untersuchung des Einflusses schwankender Rohteiltemperaturen auf Prozess- und Bauteilgrößen wurden Rohteile mit Temperaturen zwischen 1180 und 1250°C geschmiedet.

Die Rohteiltemperatur nimmt Einfluss auf die Ausstoßerkraft. Da bei sinkenden Temperaturen das Schmiedeteil weniger stark im Gesenk nach der Umformung schrumpft, erhöht sich mit abnehmender Rohteiltemperatur die Ausstoßerkraft (Bild 6.42).

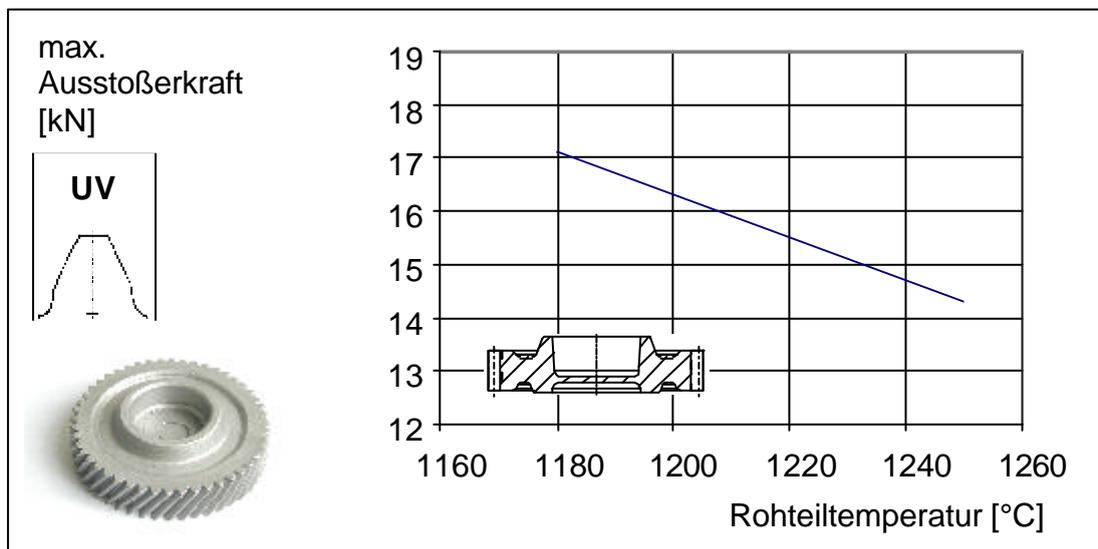


Bild 6.42: Einfluss der Rohteiltemperatur auf die maximale Ausstoßerkraft bei umformtechnisch optimierter Verzahnung in der 3. Umformstufe

Durch die geringere Schrumpfung bei der niedrigeren Rohteiltemperatur, ergibt sich ein höheres Schleifaufmaß auf der Verzahnung.

Eine Veränderung in der Rohteiltemperatur führt auch zu einer anderen axialen Schrumpfung, wodurch sich eine Veränderung des Schrägungswinkels ergeben kann.

Für die Hartfeinbearbeitung ist die Verteilung des Schleifaufmaßes von Bedeutung (vgl, Kap. 5.2.1). Der Einfluss der Rohteiltemperatur auf das Schleifaufmaß lässt sich überschlägig berechnen.

Die geometrischen Verhältnisse am Zahnprofil sind in Bild 6.43 dargestellt. Durch eine Veränderung der Schrumpfung wird das Zahnprofil radial verschoben.

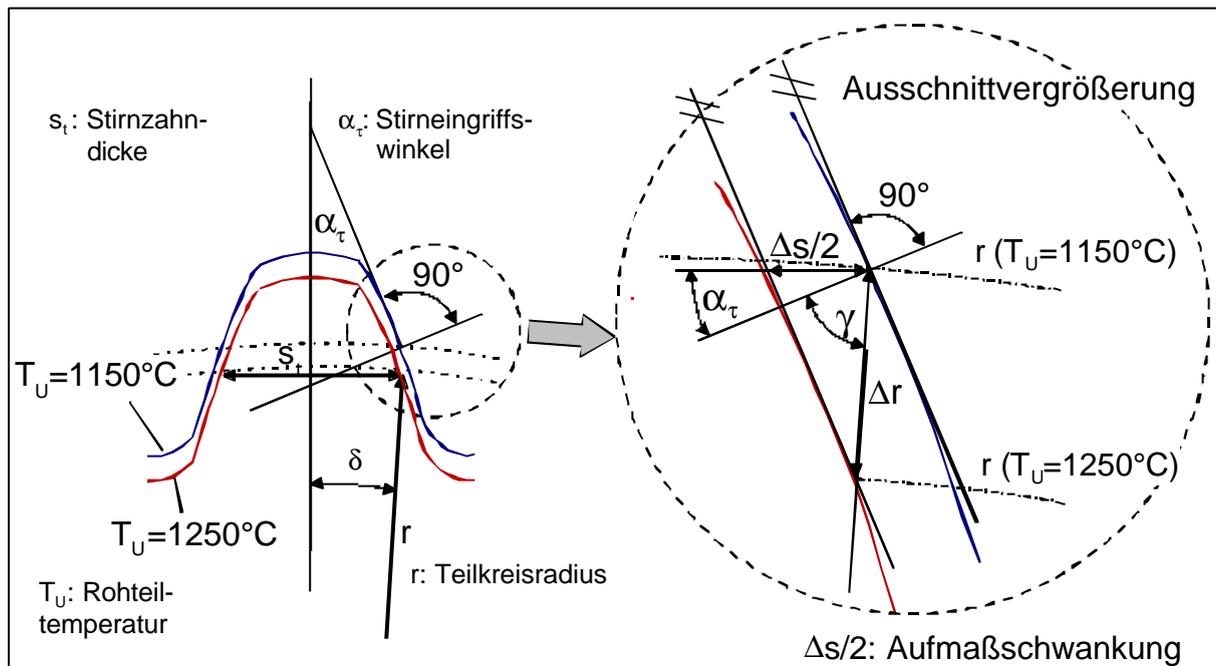


Bild 6.43: Berechnung der Veränderung des Schleifaufmaßes auf den Zahnflanken bei unterschiedlichen Temperaturen, Darstellung im Stirnschnitt, nach /Bohn99b/

Die radiale Verschiebung Δr ist für die Änderung des Schleifaufmaßes verantwortlich, sie lässt sich nach folgender Formel berechnen

$$\Delta r = r \cdot a \cdot \Delta T . \quad (6.8)$$

r : Teilkreisradius

a : Längenausdehnungskoeffizient

(Längenausdehnungs-Koeffizient für legierte Stähle α : 0,000 016 1/°C) /Haus67/

ΔT : Temperaturunterschied des Rohteils

$$\frac{\Delta s}{2} = \frac{\cos g \cdot \Delta r}{\cos a_t} \quad \text{mit} \quad (6.9)$$

$$g = 90^\circ - a_t - d \quad \text{und} \quad (6.10)$$

$$d = \frac{1}{4} \cdot \frac{360^\circ}{z} \quad (6.11)$$

z : Zähnezahl

a_t : Stirneingriffswinkel ($\tan a_n = \tan a_t \cdot \cos b$)

In Tabelle 6.2 sind die Ergebnisse dieser Rechnung bei Veränderung der Rohteiltemperatur von 1250°C auf 1180°C für die umformtechnisch optimierte und die Referenzverzahnung (Hochverzahnung) dargestellt. Für die umformtechnisch optimierte Verzahnung wurde die Veränderung der Stirnzahndicke mit der Rohteiltemperatur an 6 Zahnrädern gemessen.

Tabelle 6.2: Abweichung des Schleifaufmaßes bei Veränderung der Rohteiltemperatur von 1250°C auf 1180°C

Umformtechnisch optimierte Verzahnung	Referenzverzahnung
<u>berechnet nach (6.9):</u>	<u>berechnet nach (6.9):</u>
Rohteiltemperatur 1250 auf 1180°C	Rohteiltemperatur 1250 auf 1180°C
$\frac{\Delta s}{2} = 27\mu\text{m}$	$\frac{\Delta s}{2} = 18\mu\text{m}$
gemessen	-
$\frac{\Delta s}{2} = 25\mu\text{m}$	

Die gemessene Zunahme der Zahndicke von 1250°C auf 1180°C liegt bei der umformtechnisch optimierten Verzahnung (UV) im Mittel bei ungefähr 25 μm und stimmt damit gut mit dem berechneten Ergebnis (Tabelle 6.2) überein.

Für die umformtechnisch optimierte Verzahnung ist aufgrund der größeren Zahndicke eine größere Schwankung des Schleifaufmaßes bei Änderung der Rohteiltemperatur festzustellen. Die wesentlich schlankeren Zähne der Referenzverzahnung reagieren auf die geänderte Rohteiltemperatur mit geringeren Änderungen am Aufmaß auf den Zahnflanken.

Bild 6.44 zeigt die Flankenabweichungen für Rohteiltemperaturen von 1180°C und 1250°C die beide in einer Matrize geschmiedet wurden, welche für eine Rohteiltemperatur von 1250°C ausgelegt war. Eine Veränderung der Rohteiltemperaturen hat nicht auf alle Werte der Flankenabweichung gleich großen Einfluss. Es wird deutlich, dass die Schrumpfung der Werkstücke einen erheblichen Einfluss auf die Flankenabweichung der Verzahnung hat.

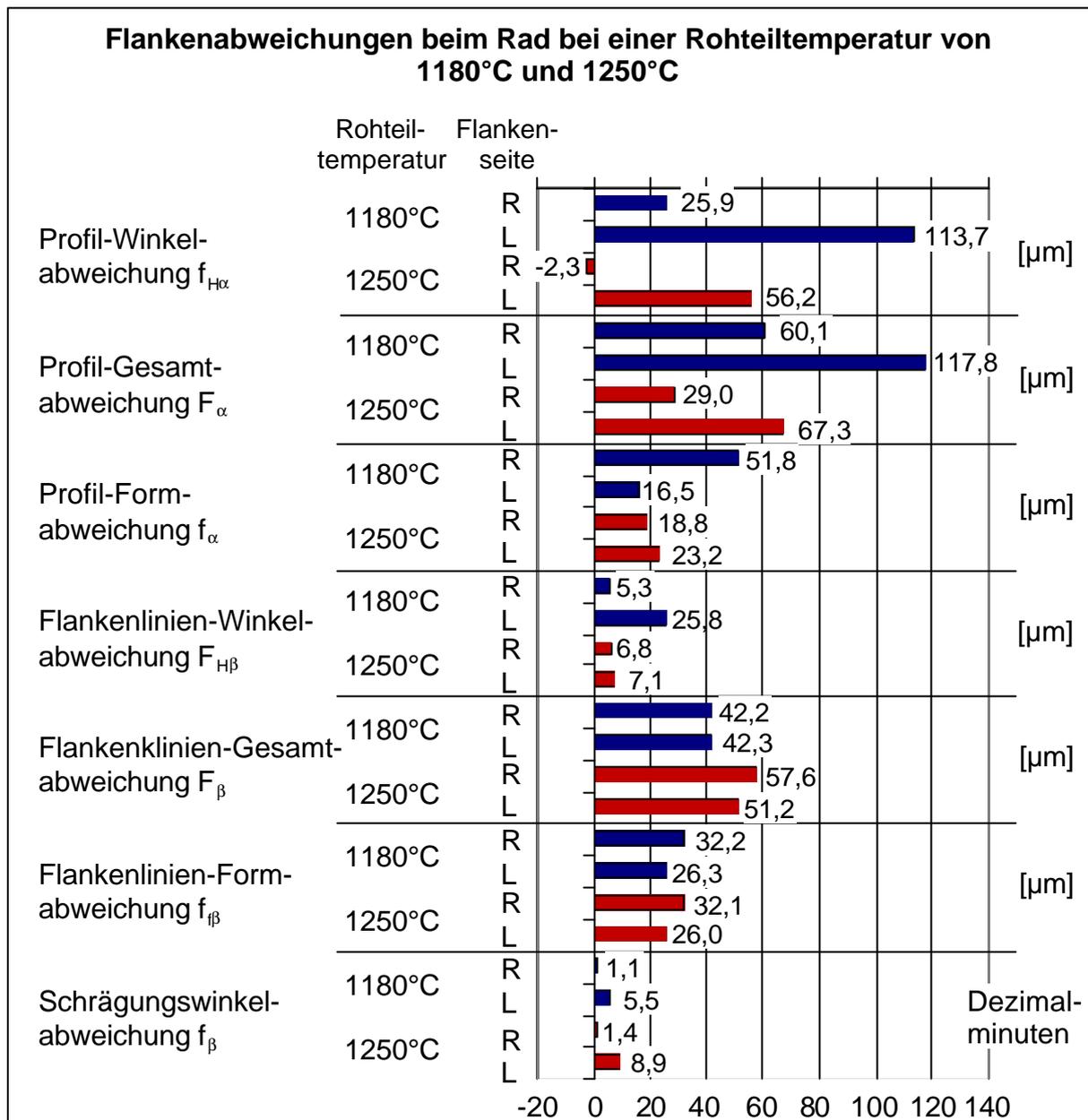


Bild 6.44: Vergleich der Profil- und Flankenabweichungen bei unterschiedlichen Temperaturen beim Rad mit umformtechnisch optimierter Verzahnung, Rohteiltemperatur 1180°C und 1250°C

Die Werte von Profilwinkelabweichung und Profilgesamtabweichung auf den rechten und linken Flanken erhöhen sich um ca. 100%. Die Profil-Formabweichung nimmt für beide Temperaturen ähnliche Werte an. Ebenso sind die Abweichungen der Flankenlinie und des Schrägungswinkels ähnlich (Bild 6.44).

Besonders deutlich wirkt sich die Rohteiltemperatur auf den Kopf- und Fußkreisdurchmesser aus. Beide vergrößern sich von 1250°C auf 1180°C um 90 µm.

Beim Rad konnte eine Verkippung der Verzahnung festgestellt werden, wobei für das rechtsdrehende Rad sich für die linken Flanken eine Profilwinkelabweichung im Mittel von 56,2 µm und auf den rechten Flanken von -2,3 µm ergab.

Diese Abweichungen in den Flanken sind durch den Ausstoßvorgang begründet. Beim Ausstoßvorgang ist bei rechtsdrehender Verzahnung des Rades die rechte Flanke (Bild 6.45) belastet. Dies führt zu einer plastischen Verformung der Zähne.

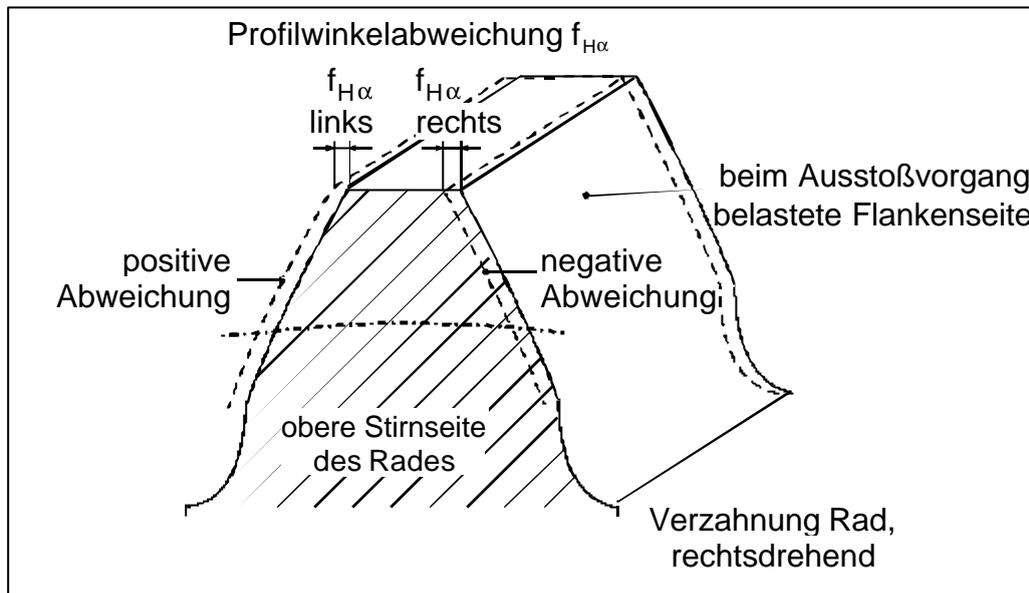


Bild 6.45: Verkipfung der Verzahnung durch Ausstoßvorgang beim rechtsverzahnten Rad

Faserverlauf des präzisionsgeschmiedeten Zahnrades

Neben der Geometrie sind weitere Qualitätsmerkmale präzisionsgeschmiedeter Zahnräder der Faserverlauf und das sich nach der Umformung einstellende Gefüge. Der Einfluss der umformtechnischen Herstellung auf die Leistungsfähigkeit von Zahnrädern hängt entscheidend vom Werkstofffluss bei der Umformung ab.

Durch Umformung können die Kristallite vielkristalliner Metalle eine bevorzugte Orientierung (Fasertextur) aufweisen. Diese von der statistisch regellosen Orientierung der Kristallite abweichende durch Umformung entstandene Orientierung bezeichnet man als Verformungstextur. Die große technische Bedeutung der Textur beruht auf der Anisotropie insbesondere der mechanischen Eigenschaften des umgeformten Werkstoffes. Dies gilt in umso stärkerem Maße, je ausgeprägter die Verformungstextur ist. /Böhm68/

Die Eigenschaften des Werkstoffes sind längs und quer zur Faserrichtung unterschiedlich /Beck62/. Die Fasern sollten sich Form und Beanspruchung des Schmiedestückes anpassen /Esch70/.

Durch entsprechenden Einsatz des Halbzeugs kann der Faserverlauf in die Richtung der Hauptbeanspruchung des Werkstückes bei seiner Anwendung gelegt werden. So werden optimale mechanische Eigenschaften erreicht. Bei einer späteren spanenden Nacharbeit sollte die Faser nicht zertrennt werden. Die richtige Orientierung der Faser

in den Zähnen eines geschmiedeten Zahnrades gibt diesem eine um ca. 18% höhere Widerstandsfähigkeit gegen Stöße und dynamische Belastung. Durch angepasste Ausbildung der Stadienfolge und der Gravuren kann die Faser an denjenigen Stellen verdichtet werden, die besonderen Beanspruchungen ausgesetzt sind. In Richtung des Faserverlaufs weist der Werkstoff besonders gute Werte hinsichtlich Festigkeit, Dehnung und Kerbzähigkeit auf. Quer zur Faser ist eine beträchtliche Verminderung der Güterwerte zu erwarten.

Bild 6.46 zeigt den sich im Querschnitt und in der Draufsicht eines Zahnes einstellende Faserverlauf in Abhängigkeit von Rohteil und Fertigungsverfahren. Bei umformtechnischer Fertigung ergibt sich für das Zahnrad in Hinblick auf die Belastungen im späteren Betrieb ein günstiger Faserverlauf.

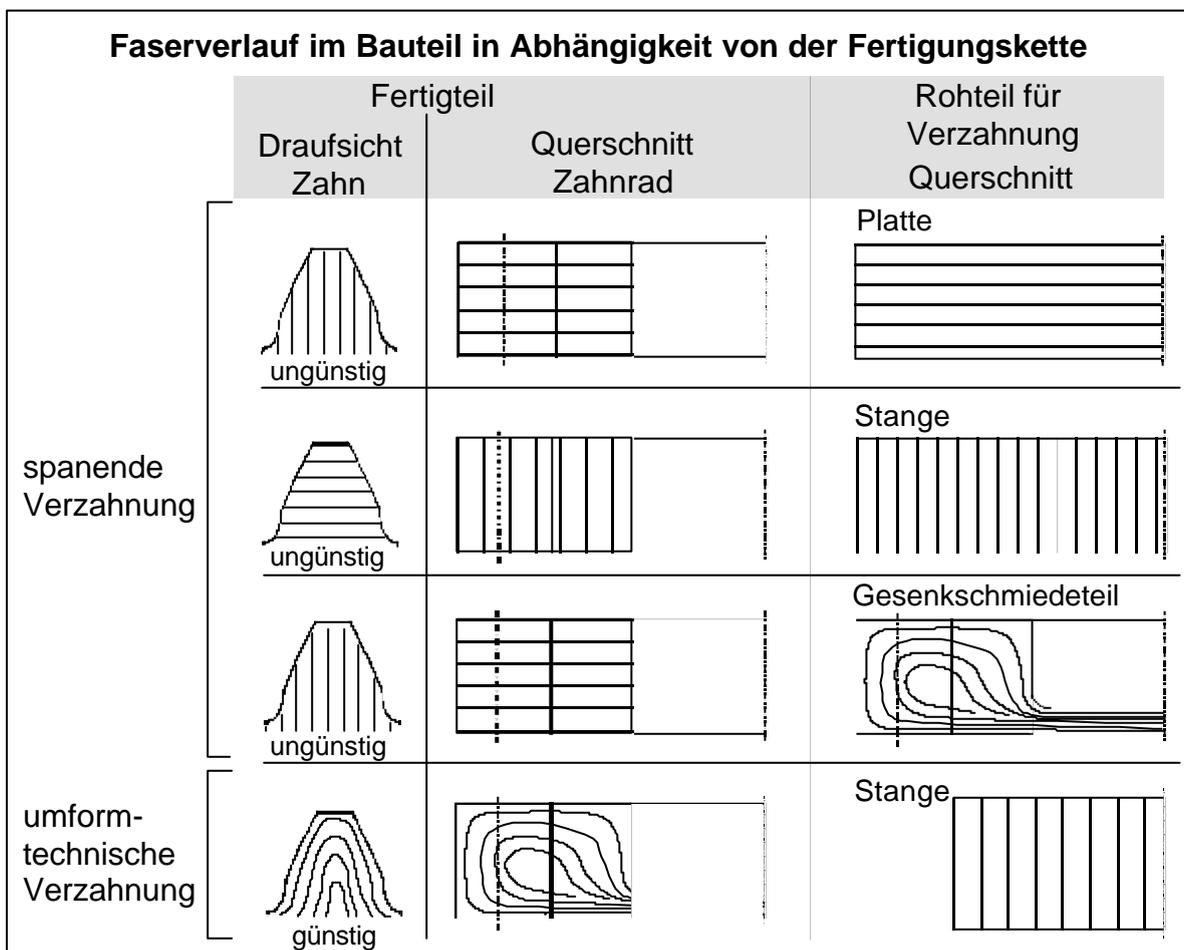


Bild 6.46: Faserverlauf in Rohteil und Fertigteil in Abhängigkeit von der Fertigungskette

Der Faserverlauf eines präzisionsgeschmiedeten Zahnrades kann über FEM-Simulationen berechnet werden. Die thermisch-mechanisch gekoppelte Rechnung mit Hilfe der FEM-Programme AUTOFORGE und FORGE3 ermöglicht die Vorhersage dieser wichtigen Eigenschaften und Zustandsgrößen des Bauteils. **Bild 6.47** zeigt die Stoffflussmarker der 3D-FEM-Simulation über den gesamten Prozess. Einerseits kann das Stoffflussverhalten des Werkstoffes in der jeweiligen Umformstufe dargestellt

werden, andererseits geben die Marker die Orientierung der Fasern im Gefüge als Ergebnis des Umformprozesses wieder.

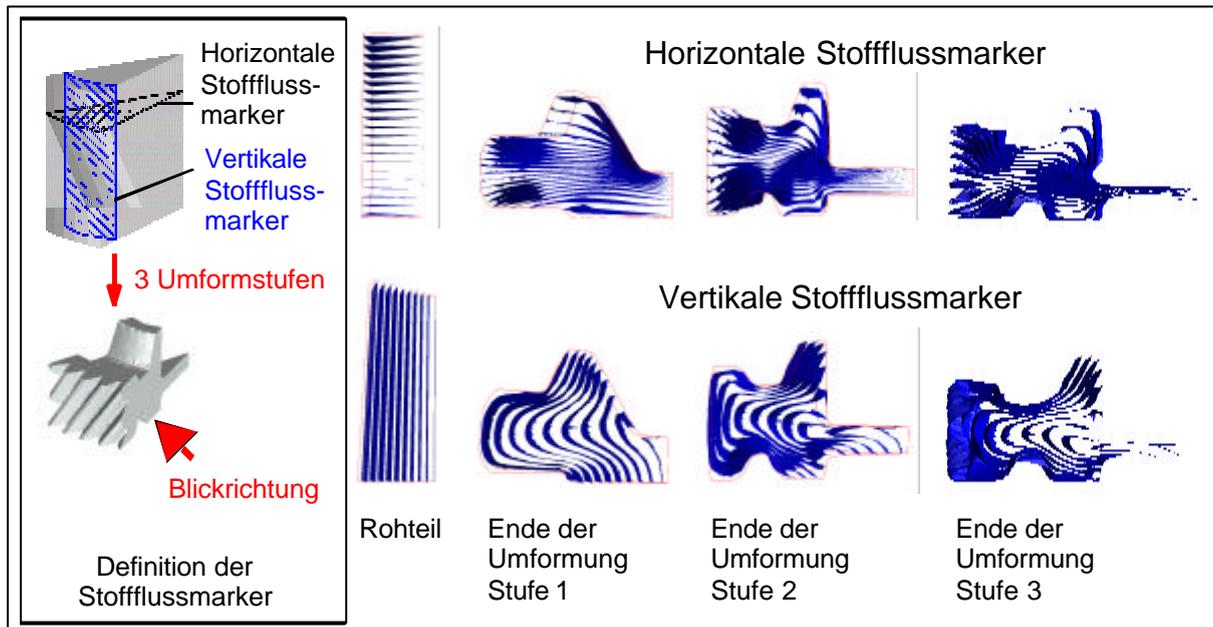


Bild 6.47: Visualisierung des Faserverlaufs des Gefüges über Stoffflussmarker mit FE-Methoden

Bild 6.47 zeigt die Veränderungen der Fließflächen (Stoffflussmarker) innerhalb des FE-Netzes als Funktion des Umformgrades. Infolge des gratlosen Präzisionsschmiedeprozesses haben die Stoffflussmarker eine nicht unterbrochene Form. Die komprimierte Verteilung der Stoffflussmarker in der Nähe der Oberflächen (obere Stirnseite, untere Stirnseite, Zahnseite) ist ein deutlicher Indikator für einen günstigen Faserverlauf mit Hinblick auf die Belastungen im Betrieb.

Der Faserverlauf entspricht der günstigen Orientierung aus Bild 6.46. Aufgrund dieses Faserverlaufs haben präzisionsgeschmiedete Zahnräder eine verbesserte Materialeigenschaft in Bezug auf die Dauerfestigkeit im Vergleich zu gespanntem.

Metallographische Untersuchung des Gefüges

Metallographische Untersuchungen wurden am geschmiedeten Bauteil durchgeführt, um die Ergebnisse der Simulation in Bezug auf den Faserverlauf zu verifizieren und weitere Aussagen hinsichtlich des Gefüges zu erhalten. Bild 6.48 zeigt die metallographisch untersuchte Fläche parallel zum Schrägungswinkel am präzisionsgeschmiedeten Rad. Sie gibt Informationen über den realen Faserverlauf. Eine gute Übereinstimmung zwischen mit Hilfe der FEM-Simulation berechneten und den realen Ergebnissen ist zu erkennen.

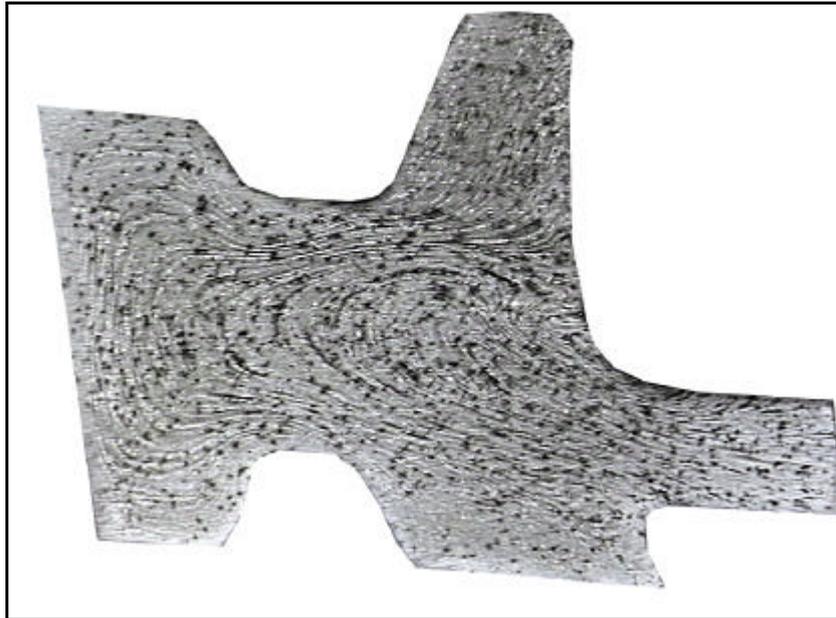


Bild 6.48: Faserverlauf des präzisionsgeschmiedeten Rades nach der 3. Umformstufe, Werkstoff: 1.7131 (16MnCr5)

Mehr Details über die strukturellen Bestandteile und die Verteilung der wesentlichen Phasen werden in [Bild 6.50](#) gezeigt. Bild 6.49 gibt einen Überblick zu den metallographisch untersuchten Werkstückbereichen. Diese wurden an neun unterschiedlichen Punkten an Laufverzahnung und Grundkörper gelegt.

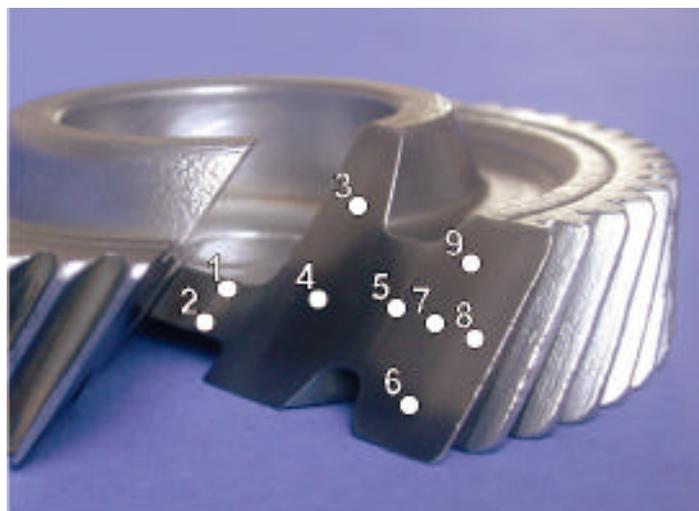


Bild 6.49: Werkstückbereiche an denen eine metallgraphische Untersuchung am präzisionsgeschmiedeten Rad durchgeführt wurden

Aufgrund unterschiedlicher Bedingungen wie vorhandene Temperaturgradienten (vgl. Bild 6.15), verschiedene Umformgrade und Umformgeschwindigkeiten entstehen unterschiedliche Gefüge im Präzisionsschmiedeteil. Bild 6.50 kann zur Überprüfung dieses Sachverhaltes herangezogen werden.

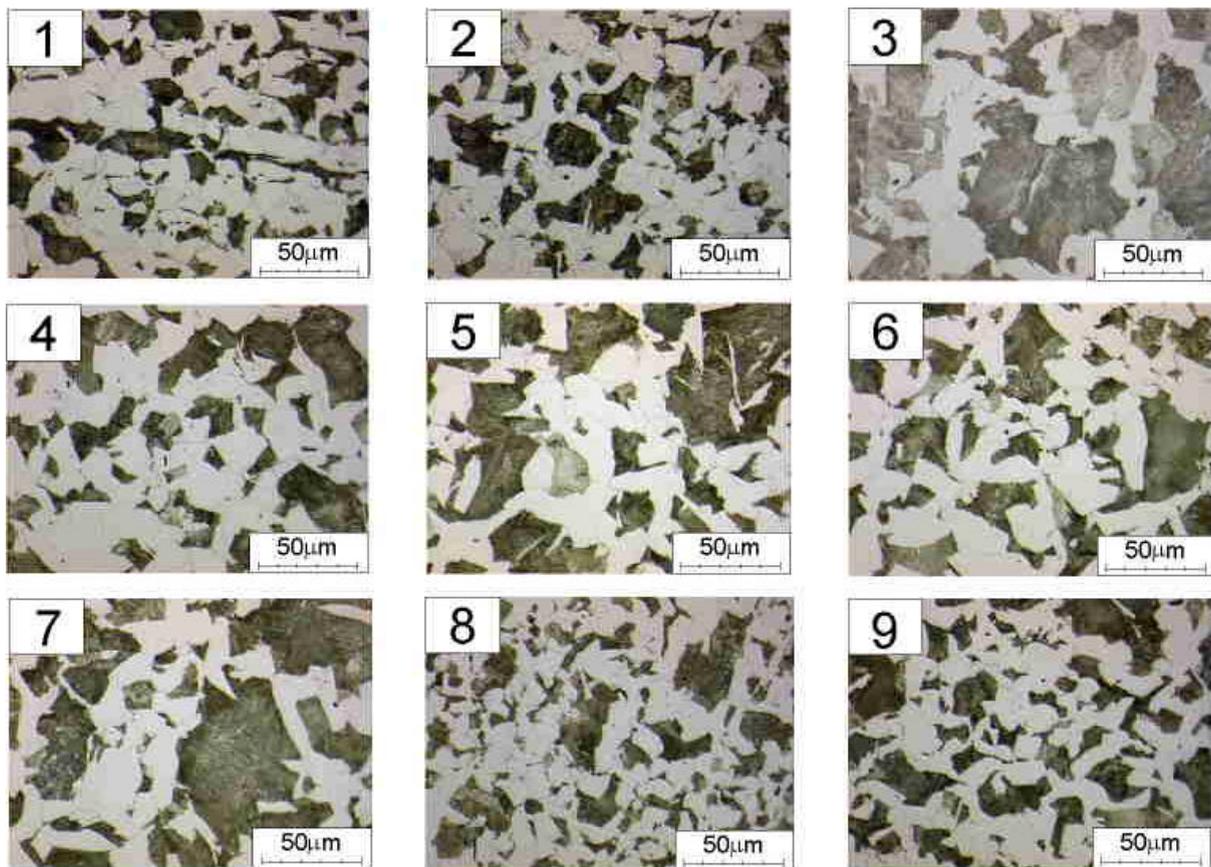


Bild 6.50: Gefüge an den in Bild 6.49 dargestellten Punkten des Zahnrades

Beruhend auf den Abkühlungsbedingungen (Sand) nach der Umformung entwickelte sich eine ferritisch/perlitische Struktur. Die Entwicklung der Korngröße im Zahnrad ist ein Ergebnis des Schmiedeprozesses und damit eine Funktion von Umformgrad und der Umformgeschwindigkeit. Dieser Zusammenhang wird bestätigt durch den Vergleich der Teilbilder 3, 5 und 7, welche eine relativ große Korngröße zeigen, mit den Bildern 1, 2, 4, 6, 8 und 9. Dennoch kann in jedem Bereich des Zahnrades ein feinkörniges Gefüge festgestellt werden.

Ein feinkörniges Gefüge ist ein Garant für ausgezeichnete Zähigkeitseigenschaften des Zahnrades.

7 Präzisionsschmieden von Pkw-Gangrädern mit Kupplungsverzahnung

In diesem Kapitel wird ein Werkzeugsystem zum Präzisionsschmieden von Pkw-Gangrädern mit hinterschnittener Kupplungsverzahnung entwickelt, konstruiert und in Schmiedeversuchen erprobt.

Bei modernen Handschaltgetrieben für Pkw werden die schaltenden Losräder mit einer Kupplungsverzahnung versehen. Diese weist einen Hinterschnitt auf, um bei eingrückter Schaltmuffe ein Herausspringen selbiger zu verhindern.

Hinterschnitte sind durch das Entformungsproblem mit umformtechnischen Verfahren schwer herstellbar. Dies gilt auch für Gangräder mit hinterstellter Kupplungsverzahnung. So gibt es bisher noch kein Werkzeugsystem mit dem ein schrägverzahntes Zahnrad mit Anlaufbereich, Laufverzahnung und hinterstellter Kupplungsverzahnung in einer Stufe schmiedetechnisch gefertigt werden kann. Ein solches Fertigungsverfahren ließe Vorteile gegenüber bestehenden (spanenden) Verfahren erwarten, da die gesamte spanende Weichbearbeitung durch den Umformprozess substituiert werden könnte.

Im Folgenden wird ein solches Werkzeugsystem vorgestellt, mit dem es möglich ist, in einer Umformstufe den Radkörper, die schrägverzahnte Laufverzahnung und die hinterschnittene Kupplungsverzahnung endkonturnah zu schmieden.



Bild 7.1: Durch konventionelle spanende Verfahren gefertigtes Gangrad mit Kupplungsverzahnung für ein Pkw-Schaltgetriebe, 2. Gang

Möglich wird die einstufige Herstellung durch Werkzeugsegmente, die vor der Umformung ein geschlossenes Gesenk mit Hinterschnitt bilden und durch eine radiale Auswärtsbewegung zu Beginn des Stößelrückhubes den Hinterschnitt freigeben und so eine Entformung der Kupplungszähne ermöglichen.

In Bild 7.1 ist das konventionell durch spanende Verfahren hergestellte Pkw-Gangrad dargestellt, für das eine präzisionsgeschmiedete Entsprechung gefertigt wird. Die komplexe Geometrie der Formelemente wird in Bild 7.1 deutlich.

Die Laufverzahnung weist einen Kopfkreisdurchmesser von 106,3 mm auf, die Bundbreite beträgt 30,9 mm und mit einem Gewicht von fast einem Kilogramm gehört dieses Rad zu den relativ großen und schweren Zahnrädern in einem Pkw-Handschalt-Getriebe. Die Laufverzahnung ist mit einem Modul von $m_n = 1,82$ relativ feingliedrig. Ein weiteres wichtiges Formelement sind die 36 hinterschnittenen Kupplungszähne und die vier Vertiefungen zur Aufnahme der Halterung des Synchronringes auf der oberen Stirnseite (vgl. Bild 7.1). Die Daten von Lauf und Kupplungsverzahnung sowie der Querschnitt des Gangrades sind in Bild 7.2 dargestellt.

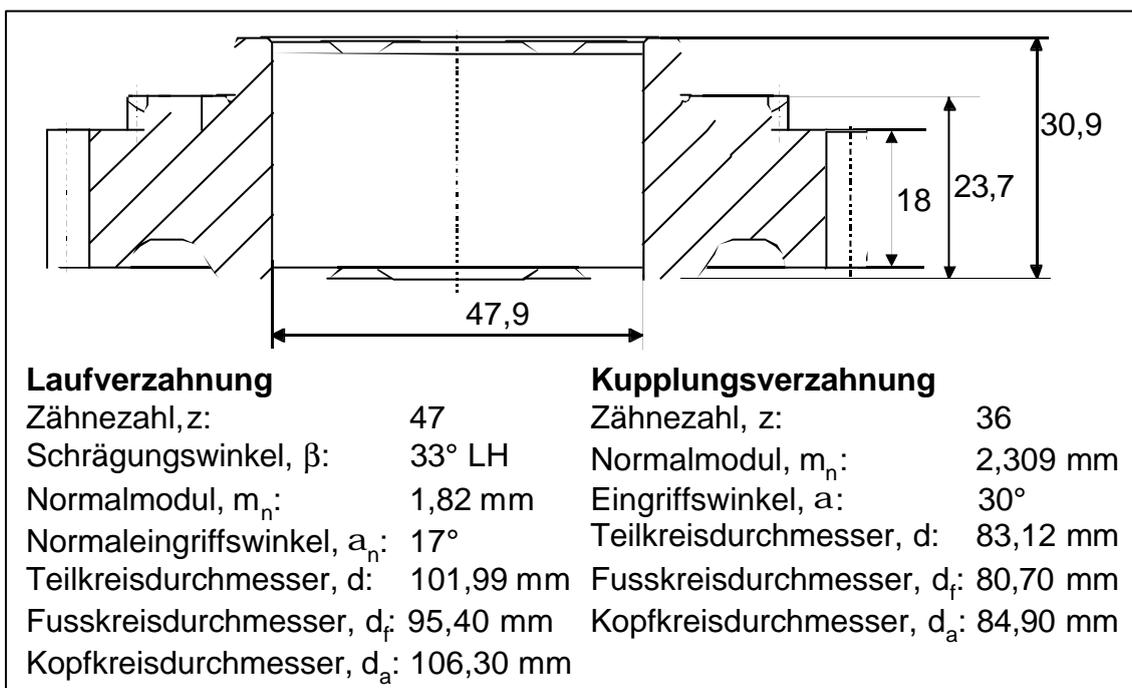


Bild 7.2: Querschnitt des untersuchten einbaufertigen Gangrades und Daten von Lauf- und Kupplungsverzahnung, Losrad Pkw-Getriebe 2. Gang

Bisher werden solche Bauteile spanend hergestellt, wobei ein Gesenkschmiedeteil als Halbzeug dient. Es gibt zwei mögliche Fertigungsvarianten für die konventionelle (rein spanende) Herstellung.

1. Sollen Pkw-Getriebe hinsichtlich des Bauraumes und Gewichtes minimiert werden, so ist die Bauhöhe des Gangrades durch Verzicht auf eine Werkzeugauslaufzone zu reduzieren. Zur Reduzierung bewegter Massen wird eine Volumenabnahme dieser Zahnräder angestrebt, so wird die Laufverzahnung aus ei-

nem Gesenkschmiedeteil und die Kupplungsverzahnung aus einem gesägten Abschnitt getrennt gefertigt. Die fertig verzahnten Bauteile werden anschließend durch Laserschweißen miteinander verbunden (Bild 7.3, oben links).

2. Wird als Halbzeug ein Gesenkschmiedeteil verwendet, an dem Laufverzahnung und Kupplungsverzahnung spanend eingebracht werden, so muss für die Werkzeuge verfahrensbedingt unterhalb der Kupplungsverzahnung eine Auslaufzone vorgesehen werden (Bild 7.3, oben rechts). Dies führt dazu, dass das Bauteil an Höhe zunimmt ($H_2 > H_1$).

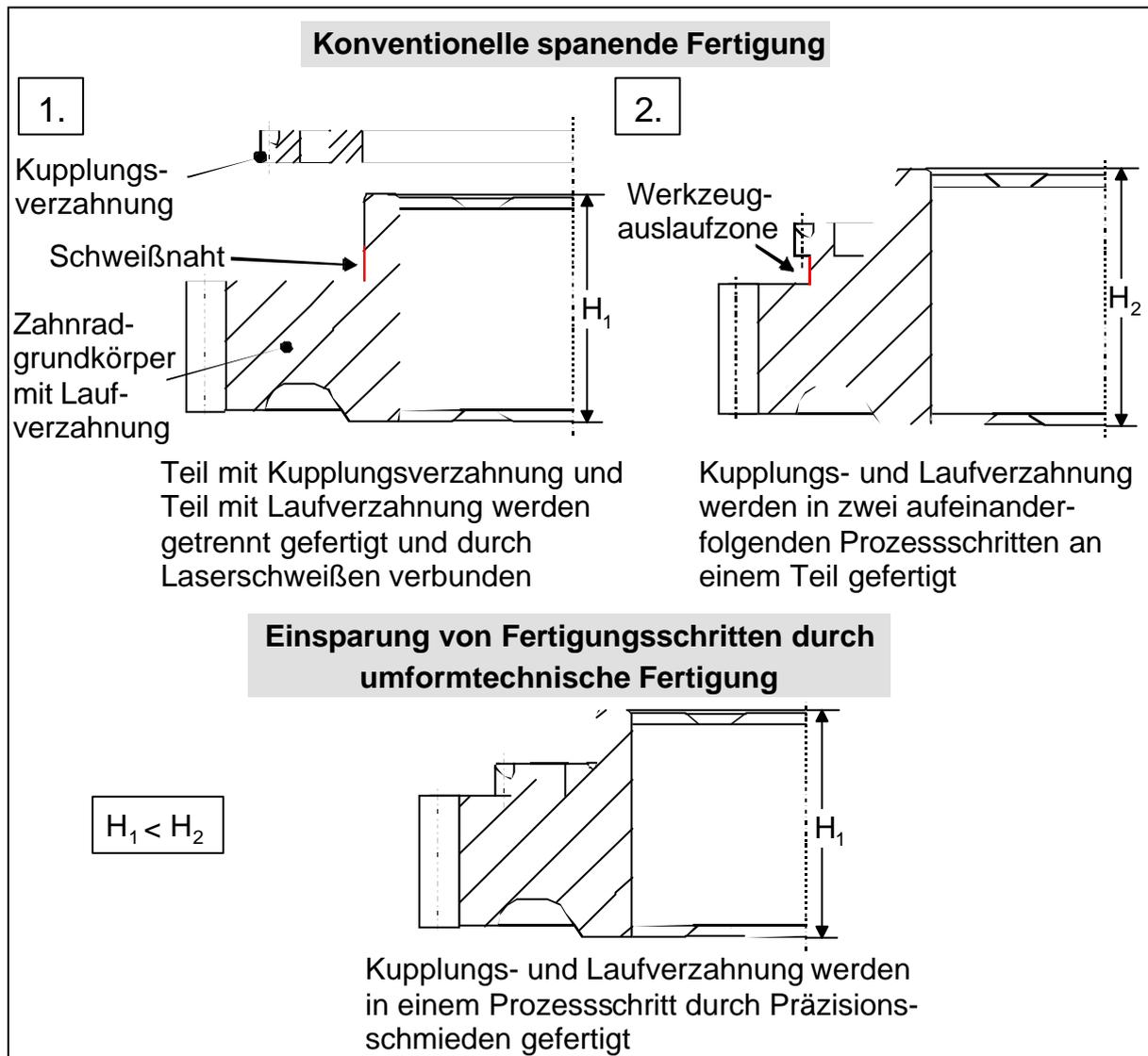


Bild 7.3: Einsparung von Fertigungsschritten und Verringerung der Zahnradhöhe durch die Ausführung eines Gangrades als präzisionsgeschmiedetes Integralbauteil

Durch die fertigungstechnischen Möglichkeiten der umformtechnischen Herstellung ist es möglich (vgl. Kap. 2.2.1), Grundkörper mit Ölnuten und allen Formelementen sowie Lauf- und Kupplungsverzahnung ohne eine Werkzeugauslaufzone in einem Prozessschritt durch Präzisionsschmieden zu erzeugen.

7.1 Auslegung des Schmiedeteils

Werden Bauteile durch Präzisionsschmieden hergestellt, so sind die besonderen Anforderungen des Prozesses zu berücksichtigen. Es ist auf eine günstige schmiedetechnische Gestaltung des Zahnrades zu achten. So sind z.B. scharfe Kanten zu vermeiden und stattdessen sollten, wenn funktionsbedingt möglich, große Radien gewählt werden.

Neben Lauf- und Kupplungsverzahnung weist das Gangrad noch weitere Funktionsflächen auf. Dies ist der Anlaufbereich, der eine scharfe Kante benötigt da dort ein Anlauftring eingesetzt wird und 4 Vertiefungen zur Fixierung des Synchronringes. Dort wurde die Geometrie so verändert, dass keine Radien zwischen vertikaler und horizontaler Kante entstehen können. Wie in [Bild 7.4](#) dargestellt, wird hier ein umlaufender Einstich vorgesehen. Des Weiteren wird auf den Anlaufflächen der Stirnseiten ein Bearbeitungsaufmaß von max. 0,15 mm erlaubt.

Die hinterschnittene Kupplungsverzahnung ist nach dem Präzisionsschmieden einbaufertig. Die Laufverzahnung hat nach dem Schmieden ein maximales Bearbeitungsaufmaß von 0,1 mm für die Hartfeinbearbeitung. An den Zahnecken der Laufverzahnung ist ein maximaler Radius in der Größe des Moduls zulässig.

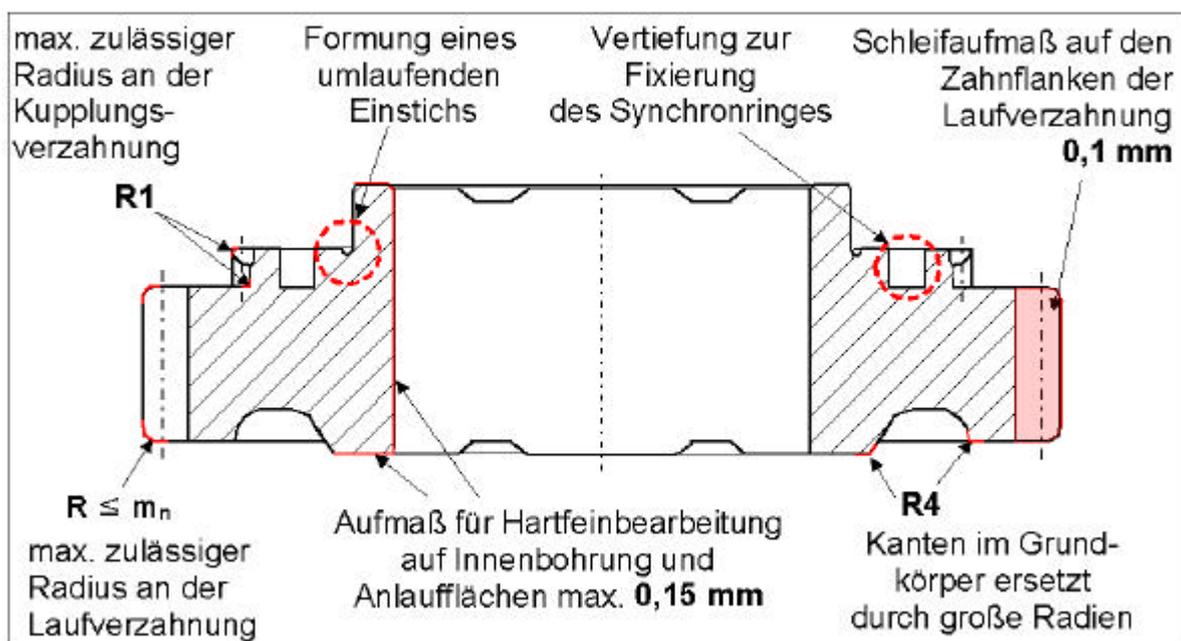


Bild 7.4: Auslegung des Gangrades als Präzisionsschmiedeteil mit Angabe der Bearbeitungsaufmaße für die Hartfeinbearbeitung

Die Innenbohrung und der untere Bereich der Stirnfläche des Zahnrades enthalten für die anschließende Hartfeinbearbeitung ein Aufmaß von maximal 0,15 mm. Die Aufmaße des Schmiedeteils werden so gering gewählt, dass nach dem Präzisionsschmieden lediglich eine Wärmebehandlung und Hartfeinbearbeitung notwendig sind.

Aufgrund der geringen Aufmaße werden hohe Anforderungen an die Lage von Kupplungsverzahnung zu Laufverzahnung und Bohrung gestellt. Da die Kupplungsverzah-

nung nicht nachbearbeitet wird, können auftretende Lagefehler lediglich durch eine Bearbeitung von Laufverzahnung und Innenbohrung in geringen Grenzen behoben werden.

7.2 Konzeption des Werkzeugs

Eine hohe Lagegenauigkeit der Verzahnungen und der Bohrung zueinander wird durch die gleichzeitige Fertigung aller Formelemente in einer Stufe ermöglicht. Bei mehrstufigen Prozessen besteht allerdings die Gefahr, dass durch Positionierungsfehler in den einzelnen Werkzeugstufen geforderte Form- und Lagetoleranzen nicht erreicht werden.

Eine Anforderung an das Verfahren ist die prozesssichere Entformung der 36 hinterschnittenen Kupplungszähne. Hierzu sind bewegliche Elemente im Werkzeug vorzusehen, die den hohen Innendrücken beim Präzisionsschmieden standhalten. Zwischen den Elementen dürfen sich keine Spalten bilden, andernfalls würde zwischen den Segmenten ein unerwünschter Grat entstehen.

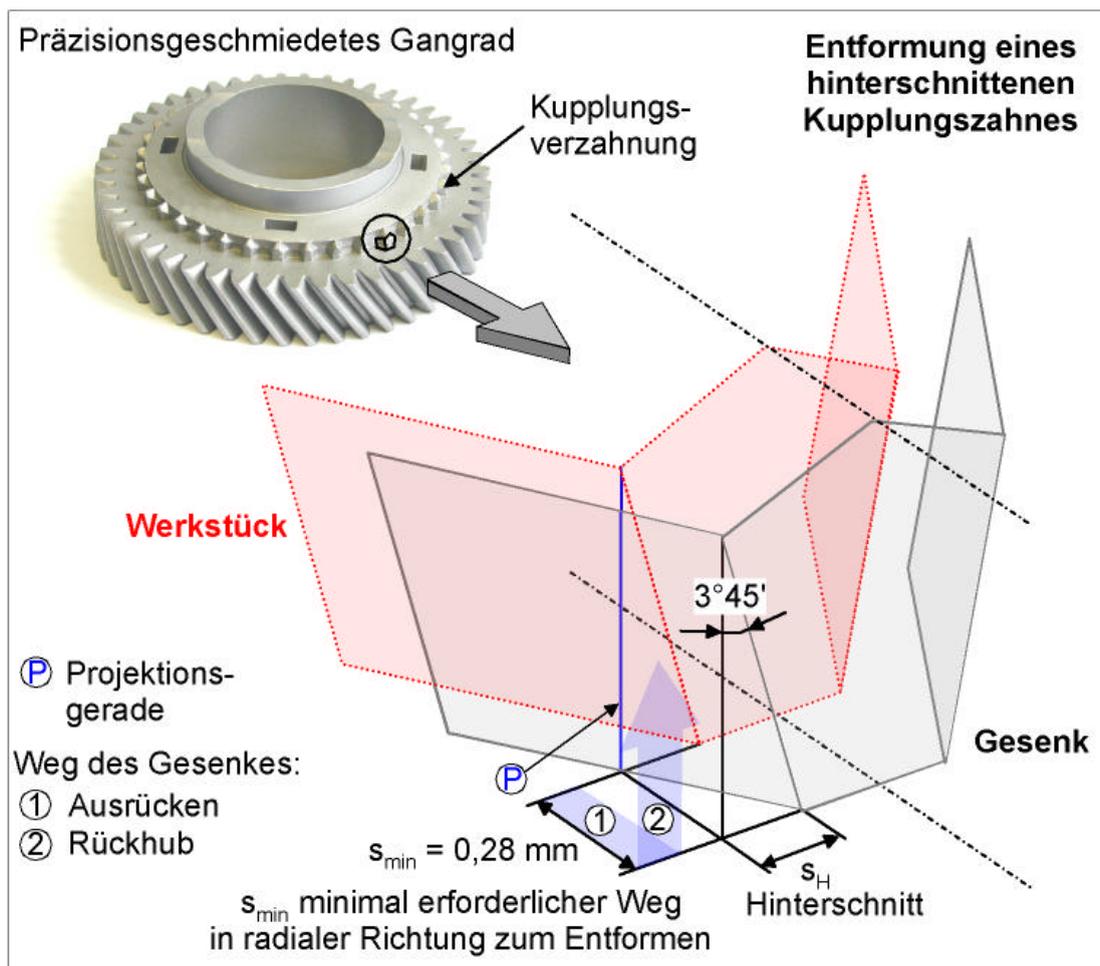


Bild 7.5: Weg des Gesenkes zur Entformung der hinterschnittenen Kupplungszähne des Gangrades

In Bild 7.5 ist der Weg dargestellt, den das einen Kupplungszahn formende Gravursegment zur Entformung zurücklegen muss. In radialer Richtung muss das Gravursegment mindestens einen Weg von 0,28 mm zurücklegen, damit ein Rückhub des Oberwerkzeugs nach Ende der Umformung in vertikaler Richtung möglich wird.

Für einen einfachen Werkzeugaufbau ist es anzustreben, möglichst wenige Segmente zu benutzen. Aufgrund der Geometrie der Kupplungszähne wird nicht für jeden Zahn ein Segment verwendet. Die Teilebene liegt jeweils in der Mitte jedes zweiten Kupplungszahnes, so dass sich in der Summe für jedes Segment 2 Zähne ergeben. Der Formbereich und Teilebenen eines Segmentes sind in Bild 7.6 dargestellt.

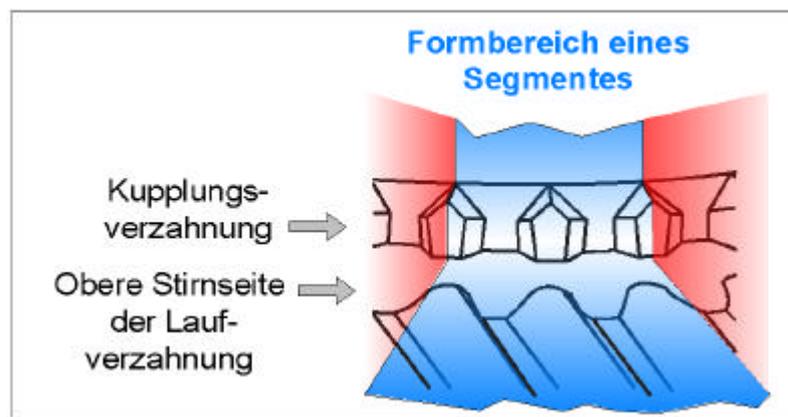


Bild 7.6: Formbereich eines Werkzeugsegmentes zur Fertigung der hinterschnittenen Kupplungsverzahnung

Das zu fertigende Gangrad weist 36 Kupplungszähne auf, welche somit durch 18 Segmente geformt werden.

7.3 Werkzeugkonstruktion

Der Präzisionsschmiedeprozess und die komplexe Werkstückgeometrie mit Hinterschnitt stellen an das Werkzeugsystem hohe Anforderungen hinsichtlich Genauigkeit und Funktionalität. Der Werkzeugkonstruktion liegen die Vorgaben der Konzeption aus Kap. 7.2 zugrunde. Es ergeben sich an das Werkzeug folgende Anforderungen:

- ◆ durch die Fertigung der einbaufertigen hinterschnittenen Kupplungsverzahnung, der schrägverzahnten Laufverzahnung mit Schleifaufmaß und der Innenbohrung in einer Stufe sollen die geforderten Genauigkeiten hinsichtlich Form- und Lage der Funktionsflächen erreicht werden,
- ◆ eine zerstörungsfreie Entformung der hinterschnittenen Kupplungsverzahnung soll durch radial ausrückende Gravursegmente realisiert werden,
- ◆ eine hohe Lagegenauigkeit zwischen Ober- und Unterwerkzeug soll erreicht werden,
- ◆ Federn sollen ein kraftschlüssiges Schließen zwischen Ober- und Unterwerkzeug

ermöglichen,

- ◆ ein modularer Aufbau des Werkzeuges soll das Schmieden von unterschiedlichen Zahnradgeometrien durch Austausch der formgebenden Gravurelemente ermöglichen sowie einen schnellen Austausch einzelner Bauteile und Baugruppen mit starkem Verschleiß,
- ◆ der Ausstoßer wird während der Linear- in eine Rotationsbewegung gezwungen, die dem Winkel der Schrägverzahnung des Bauteils entspricht,
- ◆ die Kupplungsverzahnung soll nach dem Präzisionsschmieden einbaufertig sein,
- ◆ Anlaufflächen, Innenbohrung und Laufverzahnung werden nach dem Präzisionsschmieden und der Wärmebehandlung hartfeinbearbeitet.

Beim Präzisionsschmieden von Zahnrädern ist eine Teilung der Werkzeuge notwendig, die während des Umformvorgangs durch entsprechende Schließelemente geschlossen gehalten werden (vgl. Bild 2.2). Die Teilungsebene zwischen Ober- und Untergesenk verläuft oberhalb der Laufverzahnung und unterhalb der Kupplungsverzahnung (Bild 7.7).

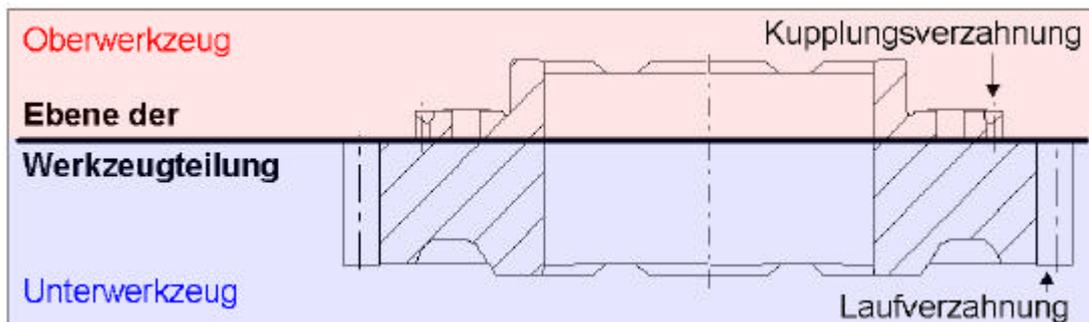


Bild 7.7: Ebene der Werkzeugteilung zwischen Ober- und Unterwerkzeug dargestellt am Gangrad

Beim Arbeiten auf einfach wirkenden Pressen sind Schließsysteme am Werkzeug anzubringen. Für Metallfedern (Druck- und Tellerfedern) spricht die breite Anwendungsmöglichkeit durch flexible Abmessungen, eine kompakte Geometrie, die Anspruchslosigkeit in der Wartung, eine leichte Instandhaltung, hohe Dauerfestigkeit sowie eine weitgehende Unempfindlichkeit gegen Verschleiß. Gegenüber den Metallfedern haben Gasfedern Vorteile wie geringen Platzbedarf, keine notwendige Vorspannung und die Federkennlinie kann verändert werden. Was besonders vorteilhaft ist, wenn in einem Werkzeug verschiedene Bauteilgeometrien gefertigt werden. So kann jeweils lediglich der minimal notwendige Druck zum Schließen des Werkzeugsystems eingestellt werden. Deshalb werden für dieses Werkzeugsystem Stickstofffedern verwendet.

Bei Gasfeder sollte die Gastemperatur 70°C nicht überschreiten, daher müssen die Gasfedern durch Wärmedämmplatten in der mittleren Führungsplatte vor einer zu starken Erwärmung durch das Obergesenk, welches Kontakt mit dem heißen Werk-

stück hat, geschützt werden. Um eine gleichmäßige Schließkrafteinleitung zu garantieren, werden die 4 Stickstofffedern über eine Ringleitung in der Führungsplatte verbunden (Bild 7.8).

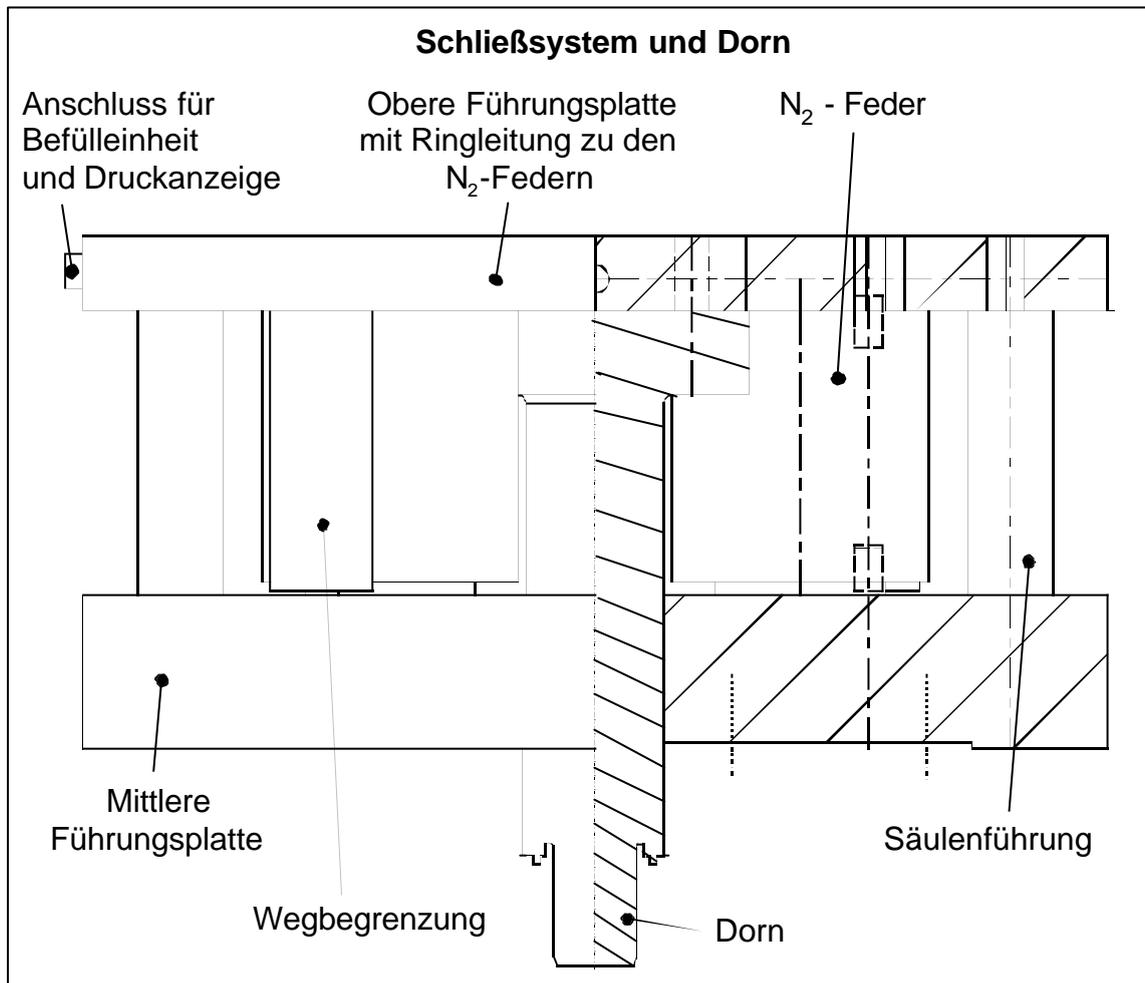


Bild 7.8: Aufbau des Schließsystems mit Stickstoffzylindern an obere Führungsplatte und Säulenführung, mittlerer Führungsplatte und Dorn

Über eine Befüll- und Kontrolleinheit, welche an der oberen Führungsplatte angeschlossen ist, kann jederzeit der im Schließsystem herrschende Druck abgelesen werden. Über ein Ventil kann der Druck erhöht oder abgesenkt werden. Die Federkraft soll die Umformung im geschlossenen Gesenk ermöglichen. Die Kraft der Federn muss ausreichen, um dem auftretenden Werkzeuginnendruck Stand zu halten und ein unerwünschtes Öffnen des Werkzeugs zu verhindern. Die erforderliche Schließkraft ist abhängig vom Gesenkinndruck und von der Fläche der Gravur, die von der Schließplatte gebildet wird. Die Schließkraft wirkt auf das Obergesenk, d.h. die Segmente zur Formung der Kupplungsverzahnung werden mit der verzahnten Matrize der Laufverzahnung axial kraftschlüssig verbunden.

Das Schließsystem des Werkzeugs und die Segmente der Kupplungsverzahnung werden in das Obergesenk integriert. Auf diese Weise wird gewährleistet, dass sich im

Bereich um Federn, Dorn und Segmente weitestgehend keine Ablagerungen wie Zunderreste und Schmierstoffe bilden können.

Formgebende Elemente des Werkzeugsystems

Die verzahnte armierte Matrize zur Formung der Laufverzahnung liegt im Untergesenk (Bild 7.9). Eine gehärtete Schonplatte zwischen Matrize und Untergesenk verhindert ein Eindringen der Matrize in die Grundplatte durch die hohen auftretenden Schließkräfte. Darunter liegt die Druckplatte, in der sich der konische Unterstempel zentriert.

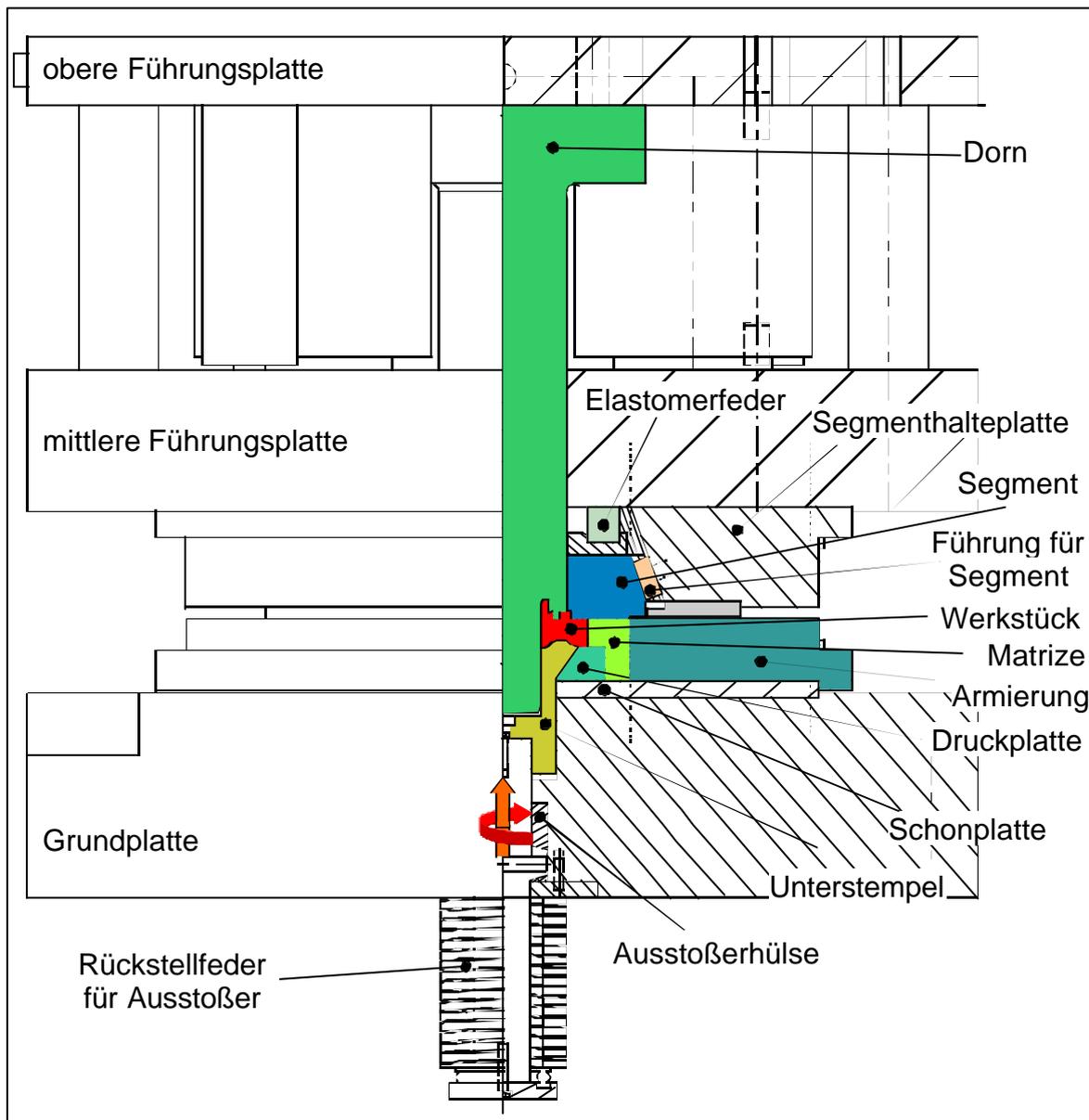


Bild 7.9: Querschnitt des Werkzeugsystems in UT am Ende der Umformung mit Bezeichnung der einzelnen Funktionselemente

Um ein beschädigungsloses Ausstoßen des geschmiedeten Teils zu ermöglichen, wird der Unterstempel durch die Ausstoßerhülse zusätzlich zu seiner vertikalen Linearbe-

wegung in eine Rotationsbewegung entsprechend dem Schrägungswinkel der Laufverzahnung gezwungen.

Er wird nach dem Ausstoßen des Schmiedeteils über eine Rückstellfeder in die Druckplatte zurückgedrückt. Die Konstruktion des Ausstoßers wird mit einer Schraubhülse ausgeführt (vgl. Bild 6.21).

Die Umformung des Rohteils wird vom Dorn durchgeführt, der in den Unterstempel eintaucht. Radial um den Dorn liegen die Segmente der Kupplungsverzahnung. Um ein exaktes Zusammenfahren der Segmente zu ermöglichen, werden diese in T-Nuten geführt (Bild 7.10). Die Segmente werden über eine Elastomerfeder, die sich auf der mittleren Führungsplatte abstützt, während des Stößelrückhubes zurückgestellt.

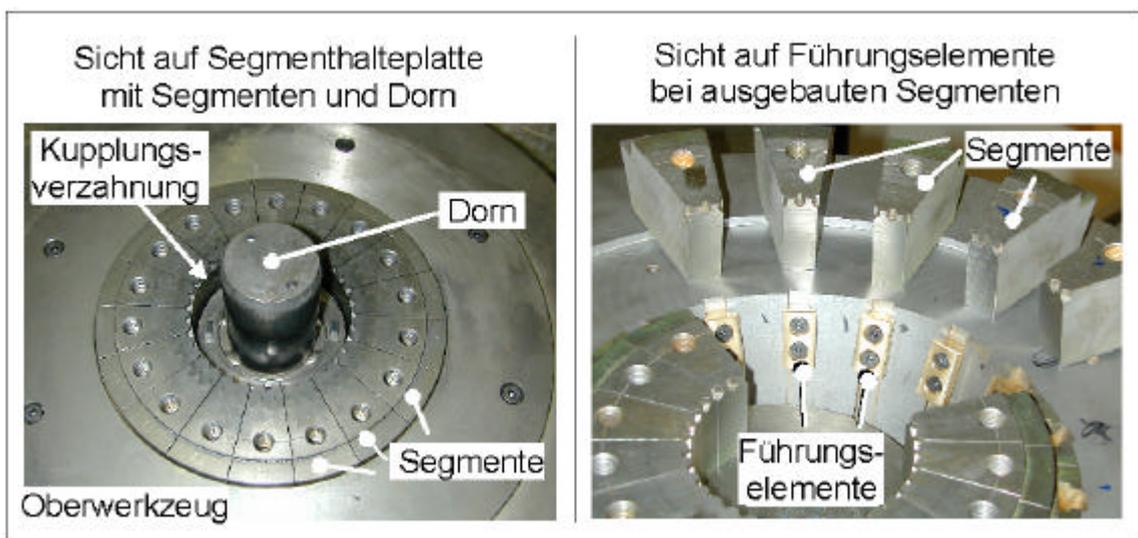


Bild 7.10: Aufbau der Segmente zur Formung der Kupplungsverzahnung

Die Gravur der Kupplungszähne wird durch Senkerodieren hergestellt. Hierbei wurden mit einer Graphitelektrode, welche alle 36 Zähne enthält, jeweils 2 Zähne gleichzeitig radial erodiert.

Das vorgestellte Werkzeug ist aufgrund seiner Komplexität mit konventionellen Gesenkschmiedewerkzeugen nicht zu vergleichen. Bild 7.11 gibt in Form einer Explosionsdarstellung eine Übersicht der einzelnen Werkzeugelemente und stellt weitere Einzelheiten des Werkzeugsystems wie Wegbegrenzung, Wärmedämmplatten, Schonplatte und den geteilten Dorn dar.

Der Dorn ist zum Austausch der formenden und damit verschleißenden Werkzeugelemente geteilt aufgebaut, er besteht aus Dornfuß, der Dornspitze, die die Innenbohrung des Zahnrades abbildet, einem Ring, der über die Dornspitze an den Dornfuß geschraubt wird und die Stirnfläche des Zahnrades bildet und vier Stiften, die die Vertiefungen in der Stirnfläche zur Aufnahme des Synchronringes bilden (vgl. Bild 7.1). Diese Stifte sind aufgrund ihres geringen Durchmessers hohem thermischem und mechanischem Verschleiß ausgesetzt, zudem haben sie den längsten Kontakt mit dem heißen Schmiedestück.

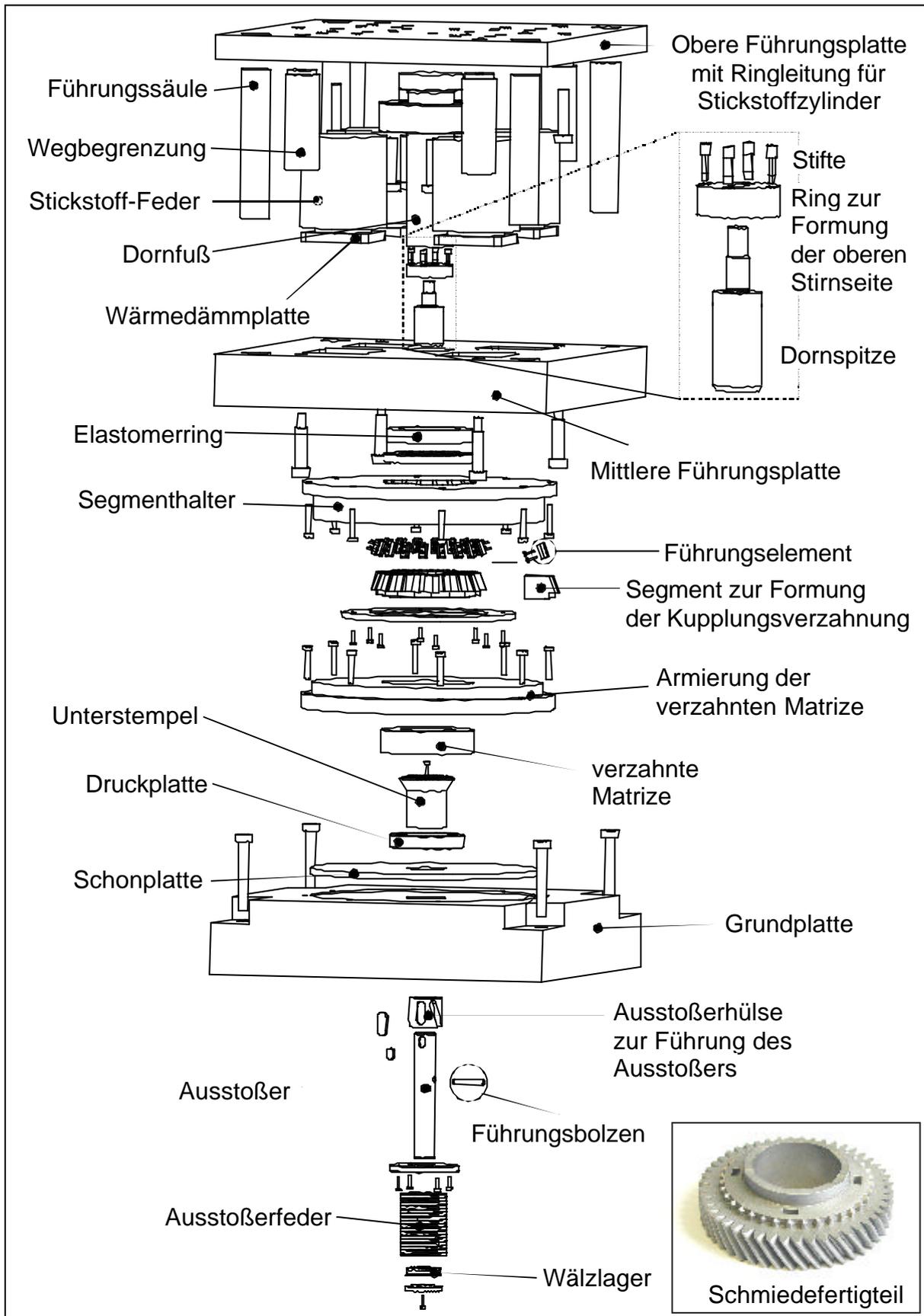


Bild 7.11: Explosionsdarstellung des Werkzeugsystems mit allen Baugruppen zum einstufigen Präzisionsschmieden von Gangrädern mit hinterschnittener Kupplungsverzahnung

7.4 Beschreibung des Umformvorgangs

Um die Funktionsweise des Werkzeugs und die Anordnung der formgebenden Elemente deutlich zu machen, ist in den Bildern 7.12 – 7.13 die Arbeitsweise des Werkzeugsystems in 5 Phasen dargestellt.

Phase 1: Der Pressenstößel befindet sich in oberen Totpunkt (OT), das Werkzeug ist geöffnet. Die Stickstofffedern im Schließsystem werden noch nicht belastet, der Elastomerfederring oberhalb der Kupplungsverzahnung ist vorgespannt, um eine definierte Lage der Segmente zu garantieren. Das auf Schmiedetemperatur (1250°C) aufgeheizte Rohteil wird auf dem Unterstempel positioniert.

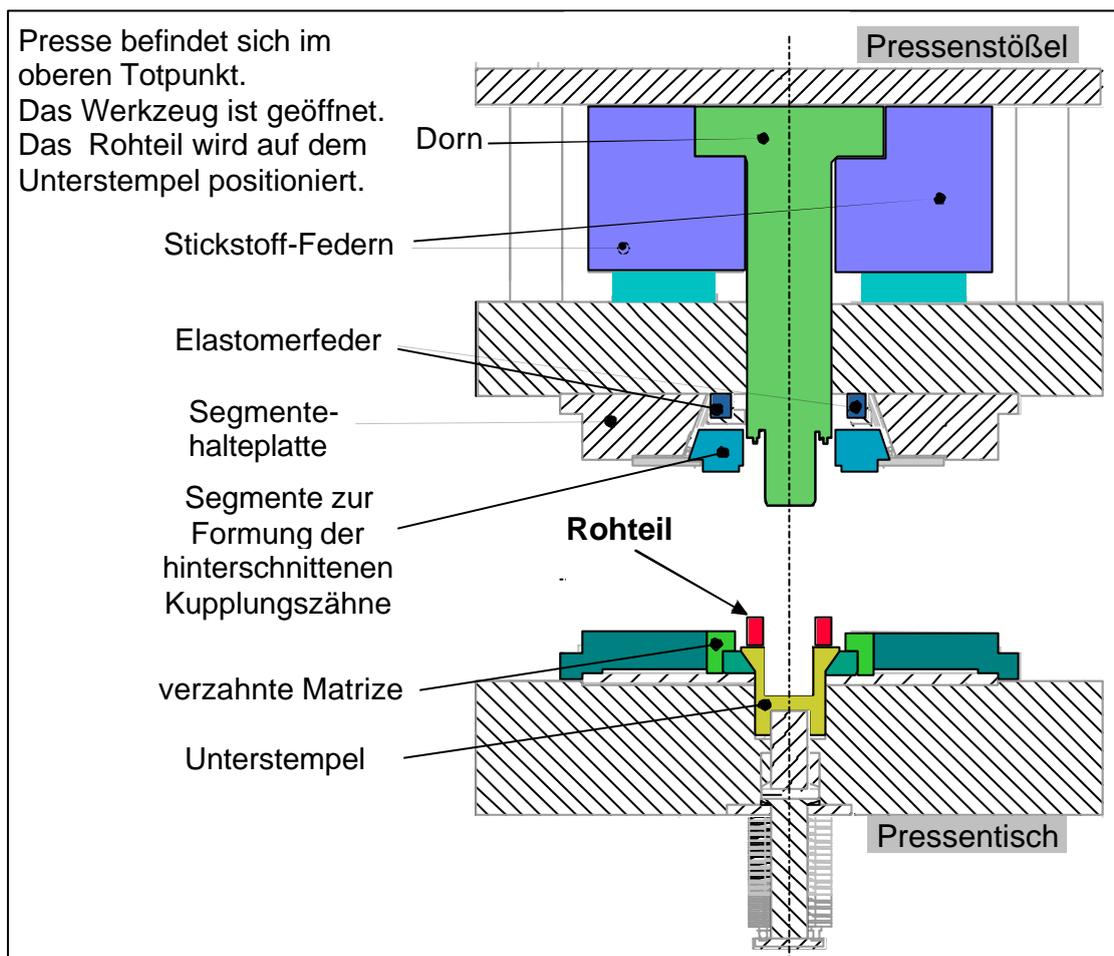


Bild 7.12: Phase 1: Werkzeug geöffnet, Rohteil wird positioniert

Phase 2: Zu Beginn des Arbeitshubes bewegt sich der Stößel der Presse mit dem Oberwerkzeug nach unten. Der Dorn taucht in den Unterstempel ein. Anschließend setzen die Segmente, welche die Kupplungsverzahnung abbilden, auf der Matrize auf und werden gegen die Elastomerfeder, die dadurch weiter gespannt wird, in den Konus der Segmentehalteplatte gedrückt. Sie bilden einen geschlossenen Ring um den Dorn. Bei der weiteren Abwärtsbewegung des Stößels bringen die Stickstofffedern die erforderliche Schließkraft auf. Es entsteht so ein kraftschlüssig geschlossenes Gesenk. (Bild 7.13)

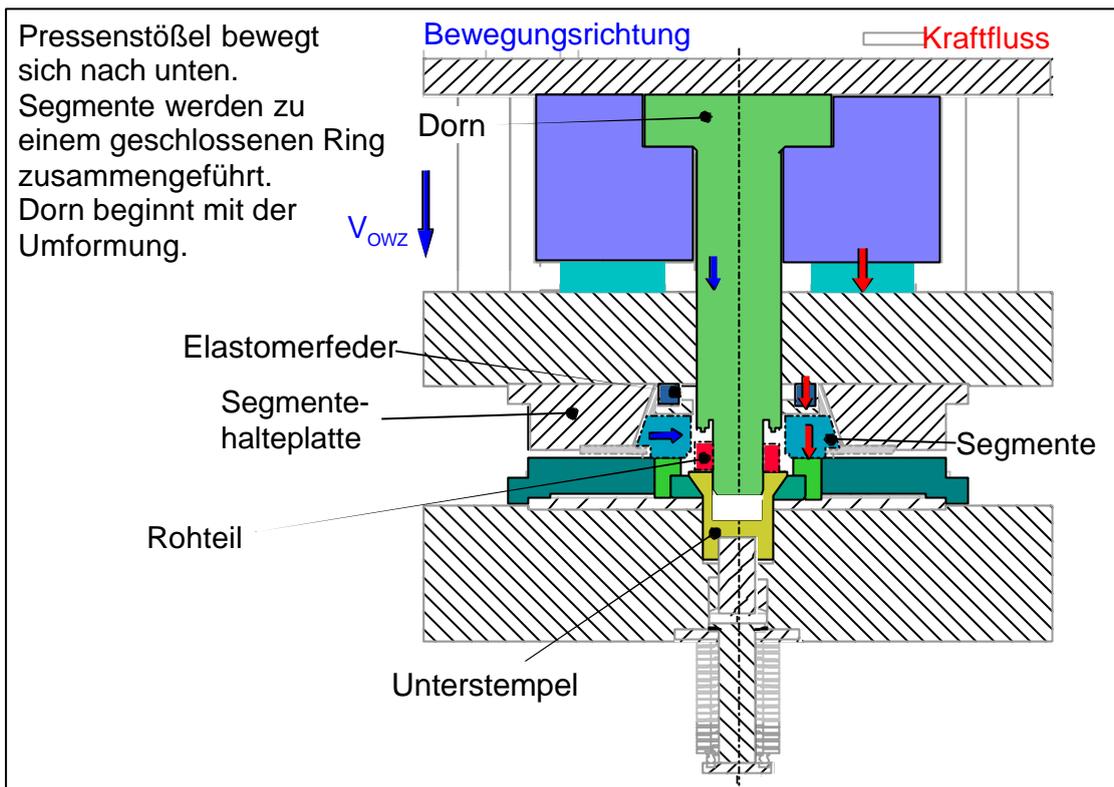


Bild 7.13: Phase 2: Gesenk wird geschlossen.

Phase 3: Die Stickstoff-Federn halten die Schließkraft, um ein Öffnen des Gesenkes während der Umformung zu verhindern. Beim weiteren Absenken des Pressenstößels beginnt der Dorn, der sich auf der oberen Platte des Säulenführungsgestelles abstützt, das Rohteil umzuformen.

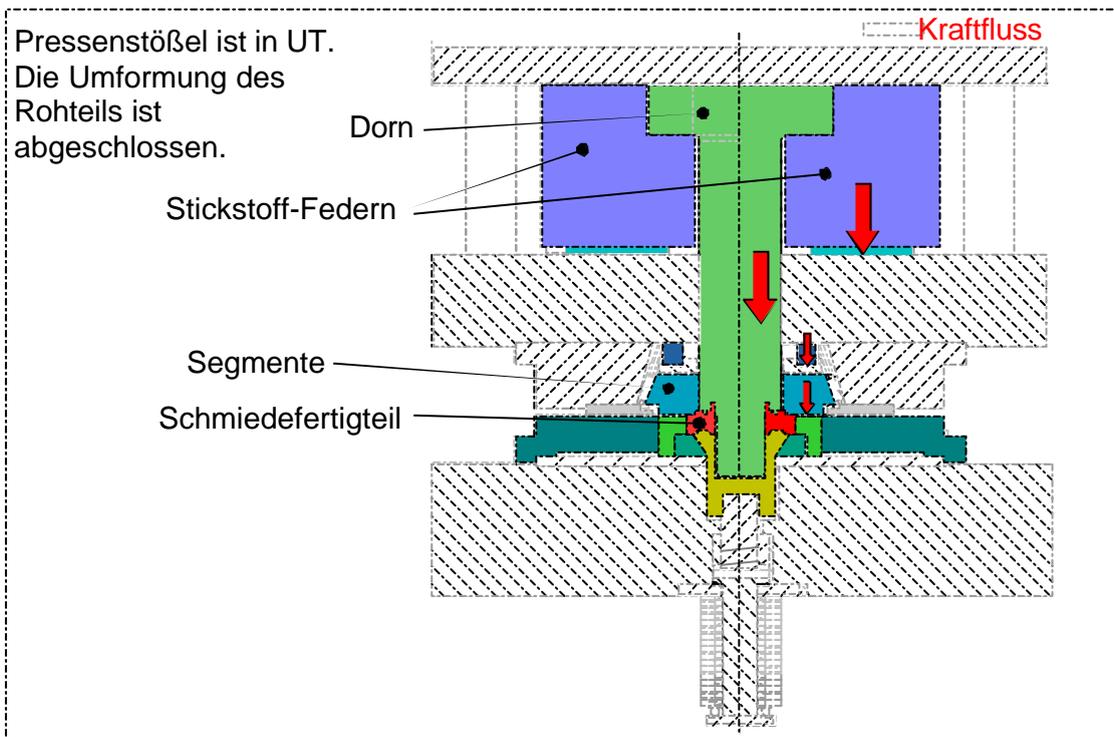


Bild 7.14: Phase 3: Umformung ist beendet, Umformmaschine in UT

Phase 4: Beim Rückhub des Pressenstößels fährt zuerst der Dorn aus der Bohrung des geschmiedeten Zahnrades. Die Kraft der Stickstofffedern nimmt beim Rückhub ab. Entspricht die Schließkraft der Stickstofffedern plus der Gewichtskraft der mittleren Führungsplatte und der Anbauteile der Federkraft des Elastomerringes (bei Vernachlässigung der Gewichtskräfte), so beginnt das radiale Ausrücken der Segmente. Diese werden bei weiterem Stößelrückhub aus dem Konus der sich nach oben bewegenden Segmentehalteplatte herausgedrückt und bewegen sich radial nach außen. Auf diese Weise wird die Kupplungsverzahnung des Gangrades zerstörungsfrei entformt.

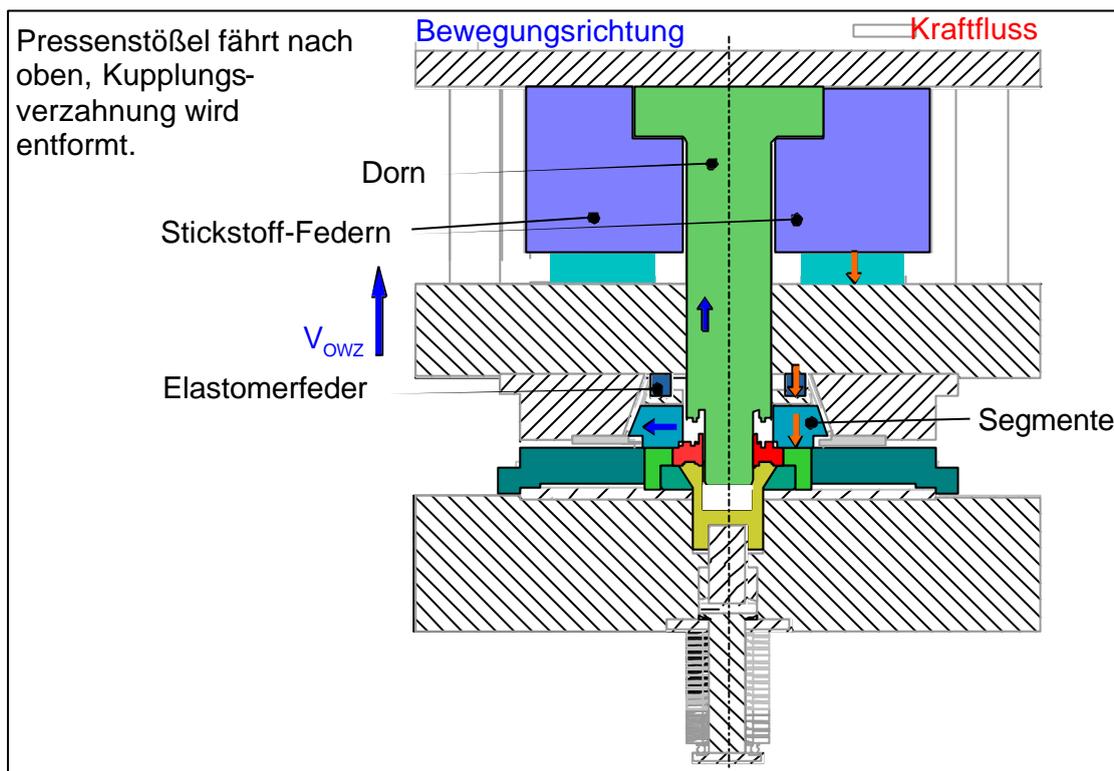


Bild 7.15: Phase 4: Pressenstößel im Rückhub, Kupplungsverzahnung des Schmiedeteils wird entformt.

Phase 5: Hat der Stößel der Umformmaschine den oberen Totpunkt erreicht, wird der Ausstoßer des Werkzeuges betätigt. Das Schmiedeteil wird anschließend mit einem aktiv drehenden Ausstoßer aus der verzahnten Matrize entformt. Der Ausstoßer wird über eine Hülse, welche eine Nut besitzt, die der Steigungshöhe der Verzahnung entspricht, neben der linearen in eine rotatorische Bewegung gezwungen.

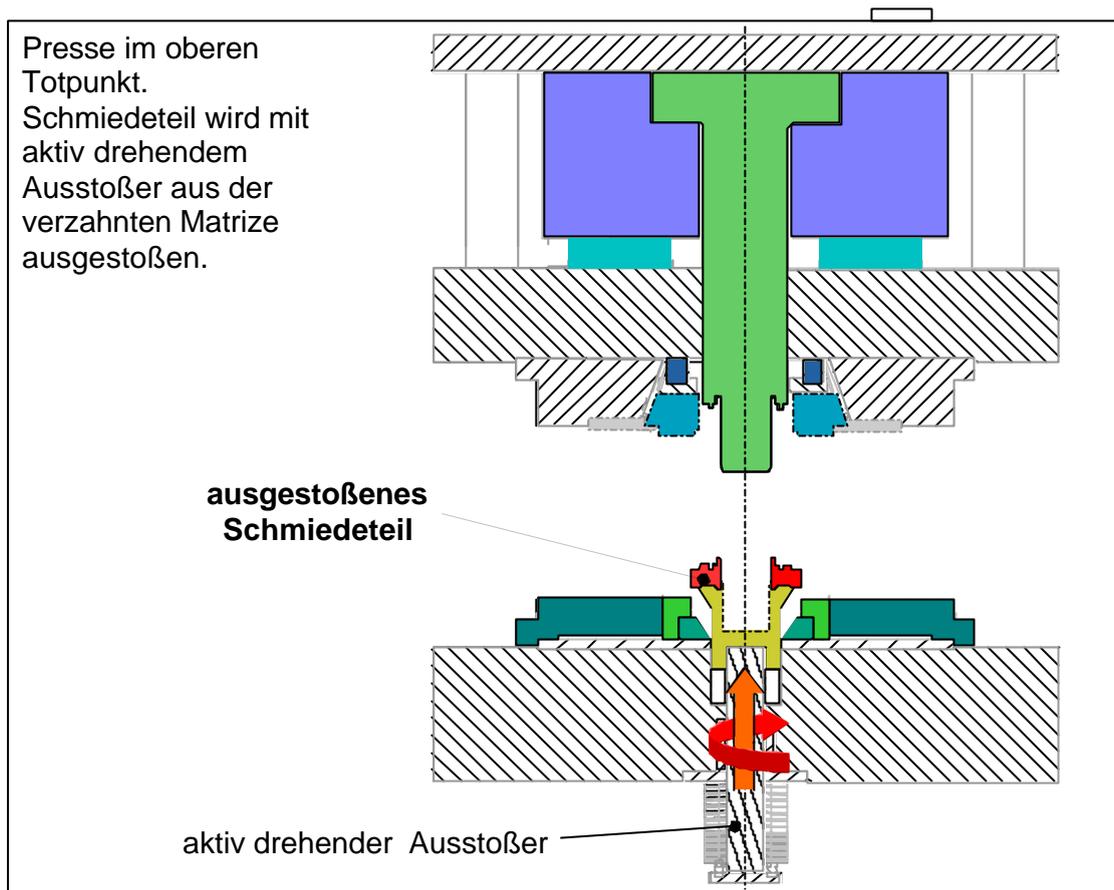


Bild 7.16: Phase 5: Schmiedefertigteil wird mit drehendem Ausstoßer aus der verzahnten Matrize entformt

Bild 7.17 zeigt das Rohteil und das daraus präzisionsgeschmiedete Gangrad mit schräger Laufverzahnung und hinterschnittener Kupplungsverzahnung.

Solche Rohteile können z.B. umformtechnisch in Schnellläuferpressen erzeugt werden und dem Präzisionsschmiedeprozess zugeführt werden. Alternativ ist entsprechend dem in Kap. 6 vorgestellten Präzisionsschmiedeprozess auch für die schmiedetechnische Herstellung eines Gangrades mit Kupplungsverzahnung eine mehrstufige Stadienfolge denkbar. Dann wäre ein Präzisionsschmiedeprozess ausgehend von Vollmaterial möglich.

Die verwendete Umformmaschine muss jedoch einen ausreichenden Presseneinbauraum zur Verfügung stellen, der sowohl das komplexe Umformwerkzeug als auch weitere Umformstufen zur Vor- und Zwischenformung aufnehmen kann.

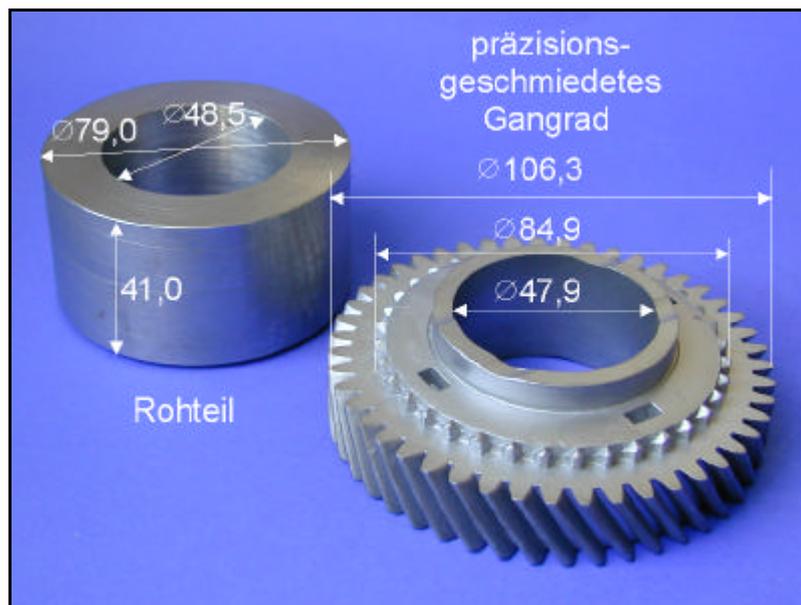


Bild 7.17: Gelochtes Rohteil und präzisionsgeschmiedetes Gangrad mit schräger Laufverzahnung und hinterschnittener Kupplungsverzahnung, Werkstoff: 1.7131 (16MnCr5)

7.5 Prozessuntersuchung und Bauteilqualität

Als komplexe Antriebskomponenten weisen Losräder von Pkw-Schaltgetrieben mehrere Funktionselemente auf. Die Laufverzahnung ist hier mit einer Schaltverzahnung kombiniert. Durch das Präzisionsschmieden ist es möglich, mehrere Funktionselemente zum Teil einbaufertig herzustellen. Parallel zur Laufverzahnung mit Bearbeitungsaufmaß wird zusätzlich eine Kupplungsverzahnung ausgeformt, welche nach dem Schmieden einbaufertig vorliegt. Von Bedeutung ist neben der geometrischen Maßhaltigkeit vor allem die Lage zwischen Kupplungsverzahnung, Laufverzahnung und Bohrung.

Als Werkstoff für die Rohteile wurde, wie bei den Untersuchungen in Kap. 6.7, der Einsatzstahl 1.7131 (16MnCr5), welcher häufig für Zahnräder eingesetzt wird, verwendet. Die Rohteile wurden in einem Kammerofen erwärmt, wobei während der Erwärmungszeit von 20 min. die Teile in einem Stahlzylinder untergebracht waren, welcher den Sauerstoffabschluss annähernd gewährleistete. So konnte eine Zunderbildung auf der Oberfläche der Rohteile nahezu unterbunden werden. Der Transfer wurde manuell durchgeführt. Zur Abkühlung wurden die Fertigteile in Sand gebettet. Als Umformmaschine wurde die in Kap. 6.3 beschriebene Kupplungsspindelpresse eingesetzt. Zur Aufnahme der Umformkraft wurden auf dem Dorn des Werkzeugs Dehnungsmessstreifen (DMS) appliziert. Des Weiteren wurde die Gestellkraft (DMS), die Anschlagkraft (DMS), die Ausstoßkraft (über Drucksensor im Hydrauliksystem des maschinenseitigen Ausstoßers) und der Stößelweg (induktiver Wegaufnehmer) während des Umformprozesses gemessen.

Bei den Schmiedeversuchen wurden als Rohteile Hohlzylinder verwendet (vgl. Bild 7.17). Der Außendurchmesser der Rohteile ($D_A = 79 \text{ mm}$) richtet sich dabei nach dem Fußkreisdurchmesser der Kupplungsverzahnung bzw. dem Außendurchmesser des Dornes (siehe Bild 7.12, 7.13), der Innendurchmesser ($D_I = 48,5 \text{ mm}$) entspricht dem Bohrungsdurchmesser der Zahnräder mit einem zusätzlichen Schleifaufmaß von $0,1 \text{ mm}$ (bezogen auf den Radius).

Bild 7.18 zeigt die während der Umformung aufgenommenen Prozessdaten: Stößelweg, Gestellkraft, Anschlagkraft und Umformkraft. Die Phasen des Umformprozesses sind entsprechend der Bilder 7.12-7.16 gekennzeichnet.

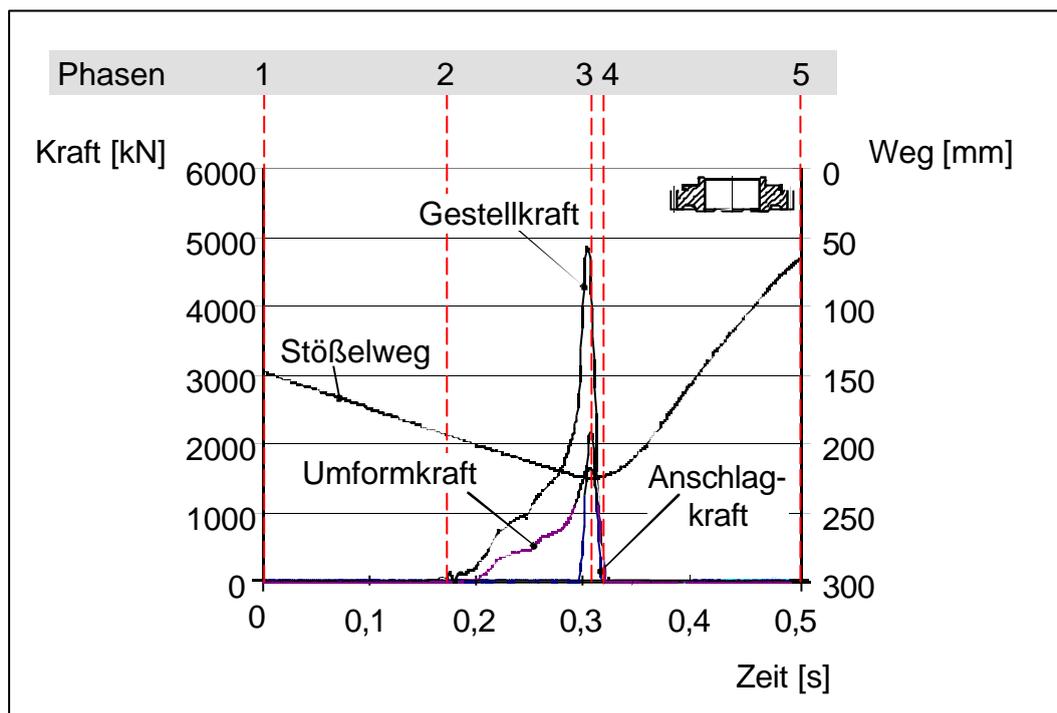


Bild 7.18: Gemessene Prozessdaten beim Umformvorgang

Bei den Untersuchungen dieses Schmiedeprozesses wurde der Einfluss unterschiedlicher Eingangsgrößen, wie Rohteiltemperatur (1180°C , 1250°C) und Rohteilmasse (-2% , 60%) untersucht. Die Einflüsse der Eingangsgrößen auf Prozess und Bauteil entsprechen qualitativ denen in Kap. 6.7 und werden hier im einzelnen nicht nochmals dargestellt (vgl. Bild 6.39 – 6.41).

Die maximale Umformkraft lag bei ungefähr 1600 kN bei einer Rohteiltemperatur von 1250°C und einer Stößelgeschwindigkeit von 250 mm/s . Die maximale Ausstoßkraft lag bei $15,8 \text{ kN}$ bei einer Rohteiltemperatur von 1250°C .

Bei der Prozessuntersuchung in diesem Abschnitt wurde untersucht, welche Eigenheiten sich für den Prozess ergeben, wenn ein Zahnrad mit Kupplungs- und Laufverzahnung in einer Umformstufe geschmiedet wird. Entscheidende Beurteilungsgrößen sind hier die erreichbaren Lage- und Maßgenauigkeiten der Formelemente. Des Weiteren

ist darauf zu achten, dass sich bei solch komplexen Gangrädern im Umformprozess keine Schmiedefehler ergeben.

Zur Visualisierung des Werkstoffflusses wurde der Prozess in bestimmten Phasen durch Erhöhung der Anschlagssäulen um den jeweiligen Betrag gestoppt. Aus Bild 7.19 wird deutlich, dass sich die Kupplungsverzahnung zuerst zu füllen beginnt, nachfolgend formen sich Lauf- und Kupplungsverzahnung parallel. Es werden vom Rohteil ausgehend drei weitere Stufen bis zum Fertigteil dargestellt.



Bild 7.19: Darstellung des Werkstoffflusses über der Ausformung des Werkstückes von links nach rechts: Pressenstößel 18 mm, 6 mm, 3 mm vor dem unteren Totpunkt (UT), in UT (Fertigteil)

Bei einem Gangrad, welches zwei Verzahnungen enthält, ist der Einfluss der Eingangsgrößen, wie z.B. der Rohteilmasse auf beide Formelemente zu beachten. Bild 7.20 stellt den Einfluss der Rohteilmasse auf die Formfüllung bzw. den Radius an der Laufverzahnung und den Radius an der Kupplungsverzahnung dar.

Bei diesem Prozess wird der maximal tolerierbare Radius an der Laufverzahnung (Größe des Normalmoduls) ab einer zu geringen Rohteilmasse von -2,0% erreicht. Zu beachten ist jedoch zusätzlich der Radius an der Kupplungsverzahnung (vgl. Bild 7.4). Der maximal zulässige Radius an dieser Verzahnung beträgt 1 mm und wird schon bei geringerer Abweichung der Rohteilmasse erreicht (Bild 7.20).

Eine zu hohe Rohteilmasse führt in erster Linie zu einer Vergrößerung der Grundkörperhöhe des Zahnrades. Aufgrund der Länge des Dorns ergeben sich für dieses Werkzeugelement sehr hohe Dehnungen. Dies kann genutzt werden, um zu hohe Rohteilmassen auszugleichen, dann ergeben sich in diesem Bereich höhere Maße für die anschließende Hartfeinbearbeitung.

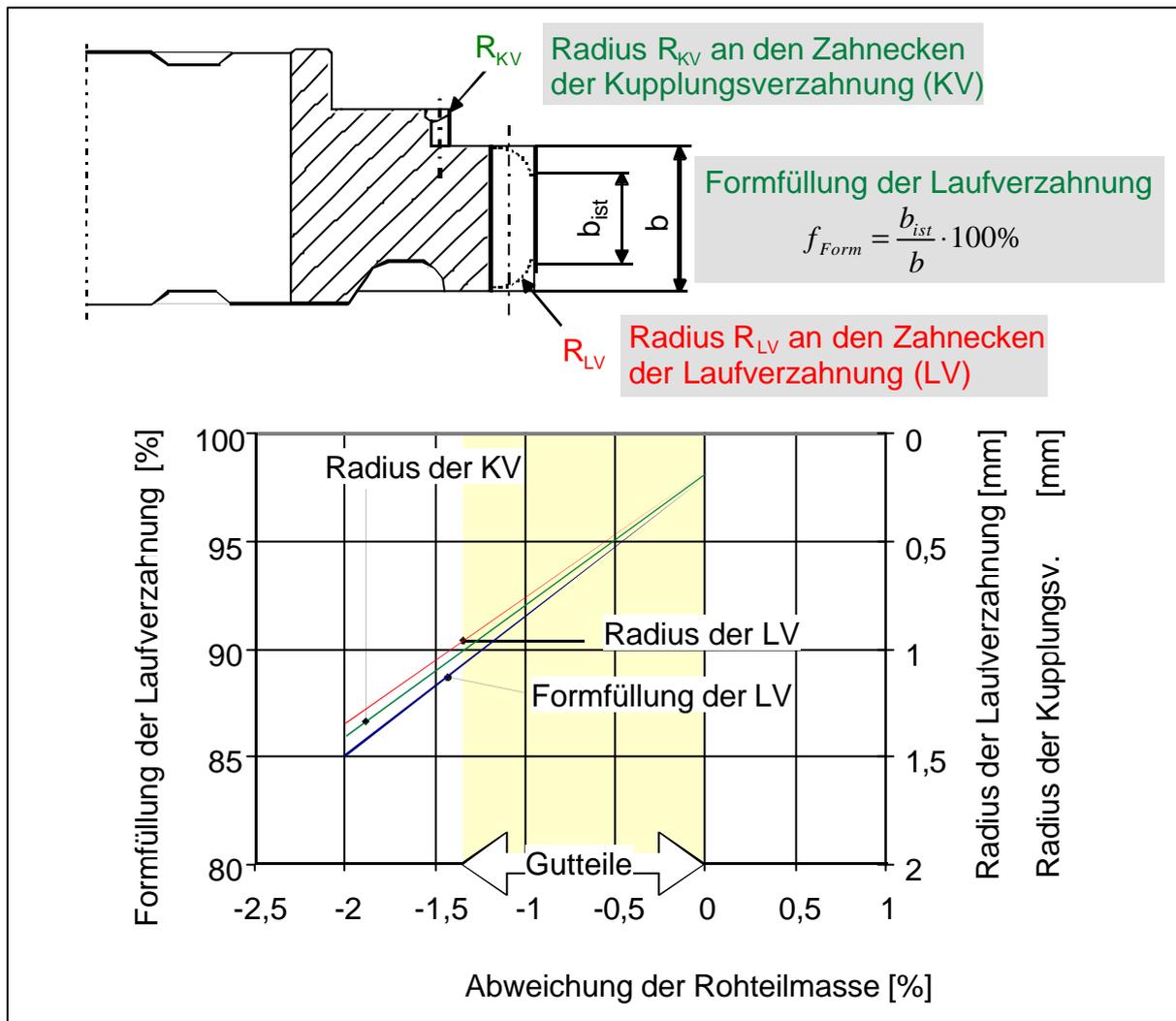


Bild 7.20: Einfluss der Rohteilmasse auf Formfüllung / Radius der Laufverzahnung (LV) und auf den Radius an der Kupplungsverzahnung (KV)

Bei Zahnrädern, die mehrere Funktionselemente enthalten, ist nicht nur die geometrische Genauigkeit der einzelnen Elemente, sondern auch die Lage dieser zueinander wesentlich. Bei dem untersuchten Gangrad ist für eine fertigungsorientierte Bewertung die Lage (Exzentrizität) von Kupplungsverzahnung zu Innenbohrung und zu Laufverzahnung von Bedeutung, um bei geringen Aufmaßen eine Hartfeinbearbeitung zu ermöglichen (Bild 7.21). Ein ausreichendes Hartfeinbearbeitungsaufmaß ermöglicht die Kompensation vorhandener Lageabweichungen. Die Kupplungsverzahnung ist nach dem Präzisionsschmieden einbaufertig, Laufverzahnung und Innenbohrung werden noch hartfeinbearbeitet.

Die Exzentrizität gibt die Lageverschiebung von zwei Mittelpunkten in Form eines Kreises an, der den einen Mittelpunkt schneidet und dessen eigener Mittelpunkt durch den Bezugsmittelpunkt geht.

Der Vorteil bei dem vorliegenden Werkzeugsystem, wie bereits ausgeführt wurde, liegt darin, dass Kupplungs-, Laufverzahnung sowie Innenbohrung in einer Stufe ge-

formt werden gegenüber einer Fertigung von Kupplungs- und Laufverzahnung in aufeinanderfolgenden Umformstufen.

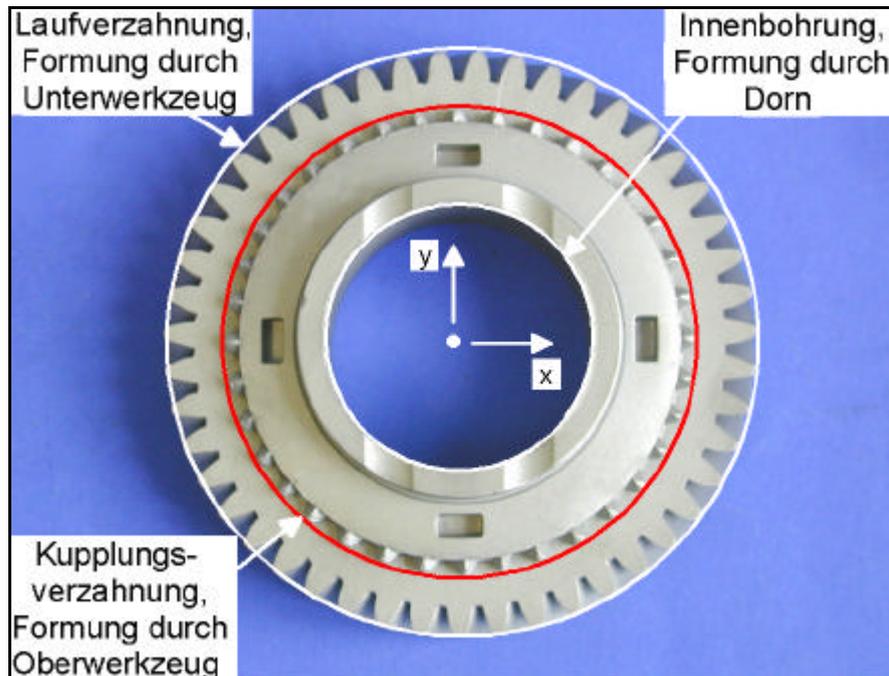


Bild 7.21: Lage von Kupplungs-, Laufverzahnung und Innenbohrung mit Angabe der formgebenden Werkzeulemente

Die formgebenden Elemente Unterwerkzeug, Dorn und Segmente werden durch den Dorn miteinander gekoppelt. Auf diese Weise konnte eine Exzentrizität zwischen Kupplungsverzahnung und Innenbohrung von 0,05 mm und zwischen Kupplungsverzahnung und Laufverzahnung von 0,11 mm eingehalten werden. Damit wird eine ausschließliche Hartfeinbearbeitung nach dem Präzisionsschmieden in Bezug auf die Lagetoleranzen möglich.

Tabelle 7.1: Lagegenauigkeit zwischen den Formelementen Kupplungsverzahnung, Laufverzahnung und Innenbohrung (Es ist der Mittelwert aus sechs Messungen angegeben)

Messung der Exzentrizitäten (DIN ISO 1101)		
Kupplungsverzahnung (Referenz)	Laufverzahnung	Innenbohrung
	$E_L = 0,11 \text{ mm}$	$E_I = 0,05 \text{ mm}$

Für die maximale Formabweichung der Rundheit (DIN ISO 1101) des Kopfkreisdurchmessers der Kupplungsverzahnung ergab sich eine maximale Abweichung von 0,08 mm. Für die Abweichung der Rundheit des Fußkreisdurchmessers der Laufverzahnung wurde ein Wert von 0,095 mm und des Kopfkreisdurchmessers von 0,127 mm gemessen. Die Toleranz des Kopfkreisdurchmessers der Kupplungsverzahnung liegt bei 0,05 mm, die der Laufverzahnung bei 0,25 mm.

Die Genauigkeit im Kopfkreisdurchmesser ist für große Durchmesser, wie bei der Laufverzahnung, bei denen die Schrumpfung wesentlich stärker ist als bei kleinen Durchmessern (Kupplungsverzahnung), wesentlich schwieriger einzuhalten.

Die Toleranz des diametralen Zweikugelmaßes lag bei der Laufverzahnung bei 0,10-0,15 mm und bei der Kupplungsverzahnung bei 0,05-0,12 mm.

Die angegebenen Toleranzen konnten über eine Kleinserie von 100 Teilen eingehalten werden.

Bei der sich dem Präzisionsschmieden und der Wärmebehandlung anschließenden Hartfeinbearbeitung des Zahnrades wird in Bezug auf die Kupplungsverzahnung, da diese einbaufertig ist und nicht nachbearbeitet wird, ausgerichtet. Anschließend werden Anlaufflächen, Laufverzahnung und Innenbohrung hartfeinbearbeitet.

Faserverlauf von spanend und umformtechnisch gefertigtem Gangrad

In metallographischen Analysen wurde der Faserverlauf des konventionell durch spanende Verfahren gefertigten Gangrades mit dem Präzisionsschmiedeteil verglichen. Die spanend gefertigte Laufverzahnung zeigt einen unterbrochenen Schnitt der Faser an der Laufverzahnung, während sich für das umformtechnisch hergestellte Gangrad ein belastungsangepasster Faserverlauf ergibt (Bild 7.22).

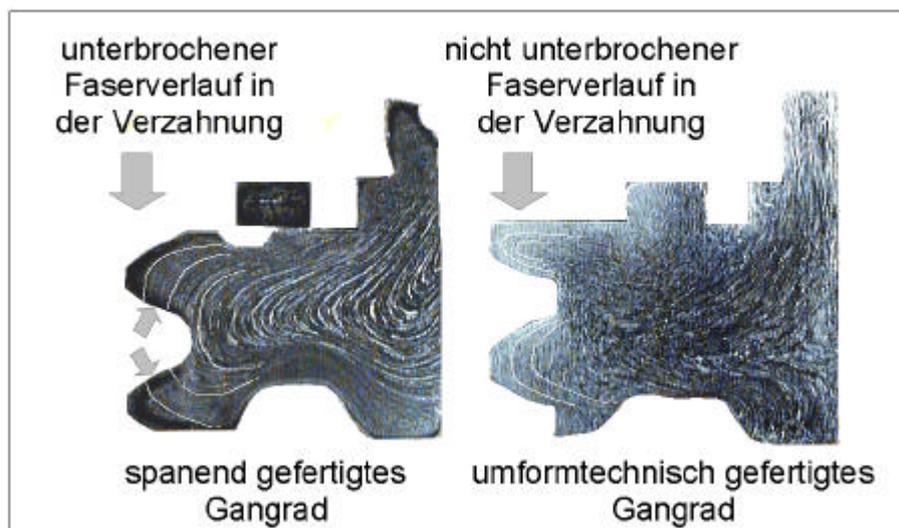


Bild 7.22: Gegenüberstellung des Faserverlaufes des spanend und umformtechnisch gefertigten Gangrades, Werkstoff: 1.7131 (16MnCr5)

Dieser Faserverlauf führt bei dem umformtechnisch gefertigten Zahnrad zu einer höheren dynamischen Belastbarkeit und zu größerem Widerstand gegen Grübchenbildung auf den Zahnflanken.

7.6 Vorteile des Verfahrens

Der Nachweis der technischen Realisierbarkeit eines alternativen Verfahrens führt nicht automatisch zur Substitution der konventionellen Fertigung. Soll eine neue Fertigungstechnologie eine andere ablösen, so steht in der Regel die wirtschaftliche Rentabilität im Vordergrund. So wird das Präzisionsschmieden erst dann die spanende Fertigung ablösen, wenn es gelingt, Zahnräder mit gleicher Qualität bei geringeren Kosten herzustellen.

Schmiedeteile haben besonders dann Vorteile gegenüber spanend gefertigten Bauteilen, wenn ihre hervorragenden Festigkeitseigenschaften wirtschaftlich ausgenutzt werden können. Der Anwendungsbereich von präzisionsgeschmiedeten Zahnrädern wird durch die technische Entwicklung begünstigt. Hier ist der steigende Anteil von Dieselmotoren und direkt einspritzenden Benzinmotoren hoher Leistung zu erwähnen. Präzisionsgeschmiedete Räder ertragen höhere Lasten gegenüber gespannten Zahnrädern gleicher Größe, da sie gegenüber gespannten Rädern eine höhere Zahnfußfestigkeit aufweisen.

Ein bedeutender Vorteil der umformtechnischen Herstellung gegenüber der spanenden ist die hohe Materialausnutzung, diese wird besonders bei komplexen Baueilen, wie Gangrädern mit Kupplungs- und Laufverzahnung, deutlich. In [Bild 7.23](#) ist für das behandelte Gangrad ein Vergleich zwischen der konventionellen (spanenden) und der umformtechnischen Fertigung mit Hartfeinbearbeitung aufgestellt.

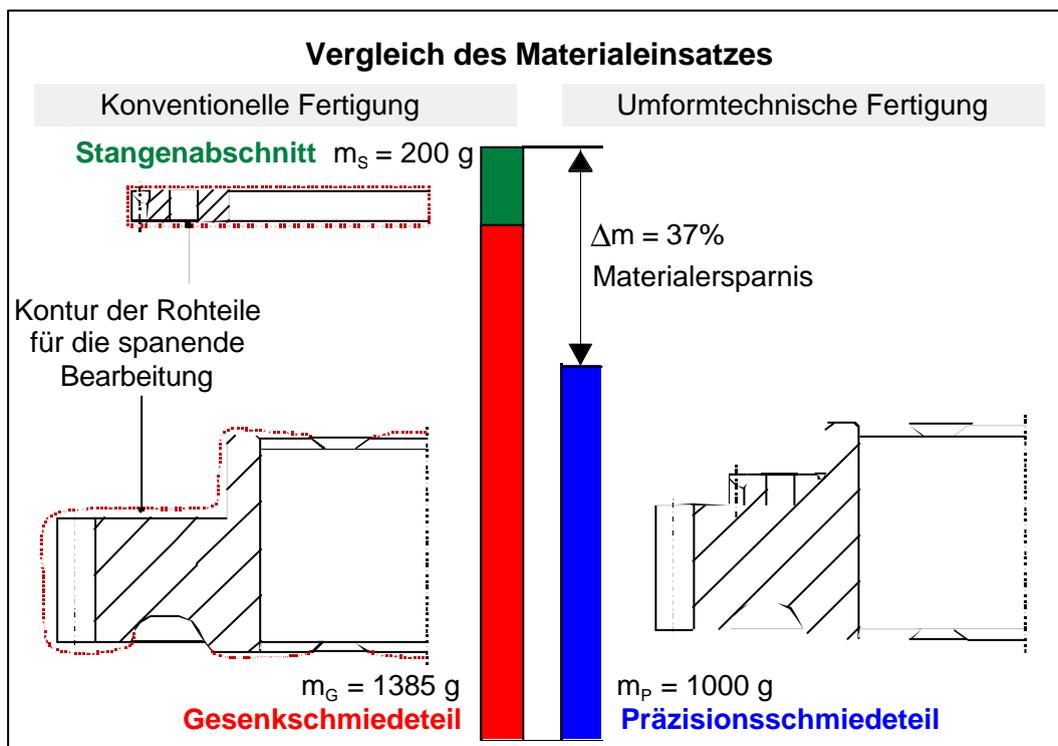


Bild 7.23: Vergleich des Materialeinsatzes zwischen konventioneller (spanender) Fertigung und umformtechnischer Fertigung mit Hartfeinbearbeitung des Gangrades

Bei der konventionellen (spanenden) Fertigung wird für den Zahnradgrundkörper von einem Gesenkschmiedeteil mit einer Masse von ca. 1385 g ausgegangen. Hinzu kommt ein Stangenabschnitt aus dem der Kranz der Kupplungsverzahnung gefertigt wird mit einer Masse von ca. 200 g. Das präzisionsgeschmiedete Fertigteil, das in einer Stufe mit allen Formelementen gefertigt wird, hat eine Masse von 1000 g. Die umformtechnische Fertigung durch Präzisionsschmieden bietet somit eine um 37 % höhere Materialausnutzung gegenüber der konventionellen Fertigungsvariante (Bild 7.23).

Bild 7.24 vergleicht die konventionelle (spanende) mit einer möglichen umformtechnischen Fertigungskette. Zur Erreichung hoher Genauigkeitsanforderungen der radialen und axialen Bezugsflächen (Bohrung, Stirnflächen) und um Härteverzüge auszugleichen, werden die Zahnräder nach der Wärmebehandlung hartfeinbearbeitet.

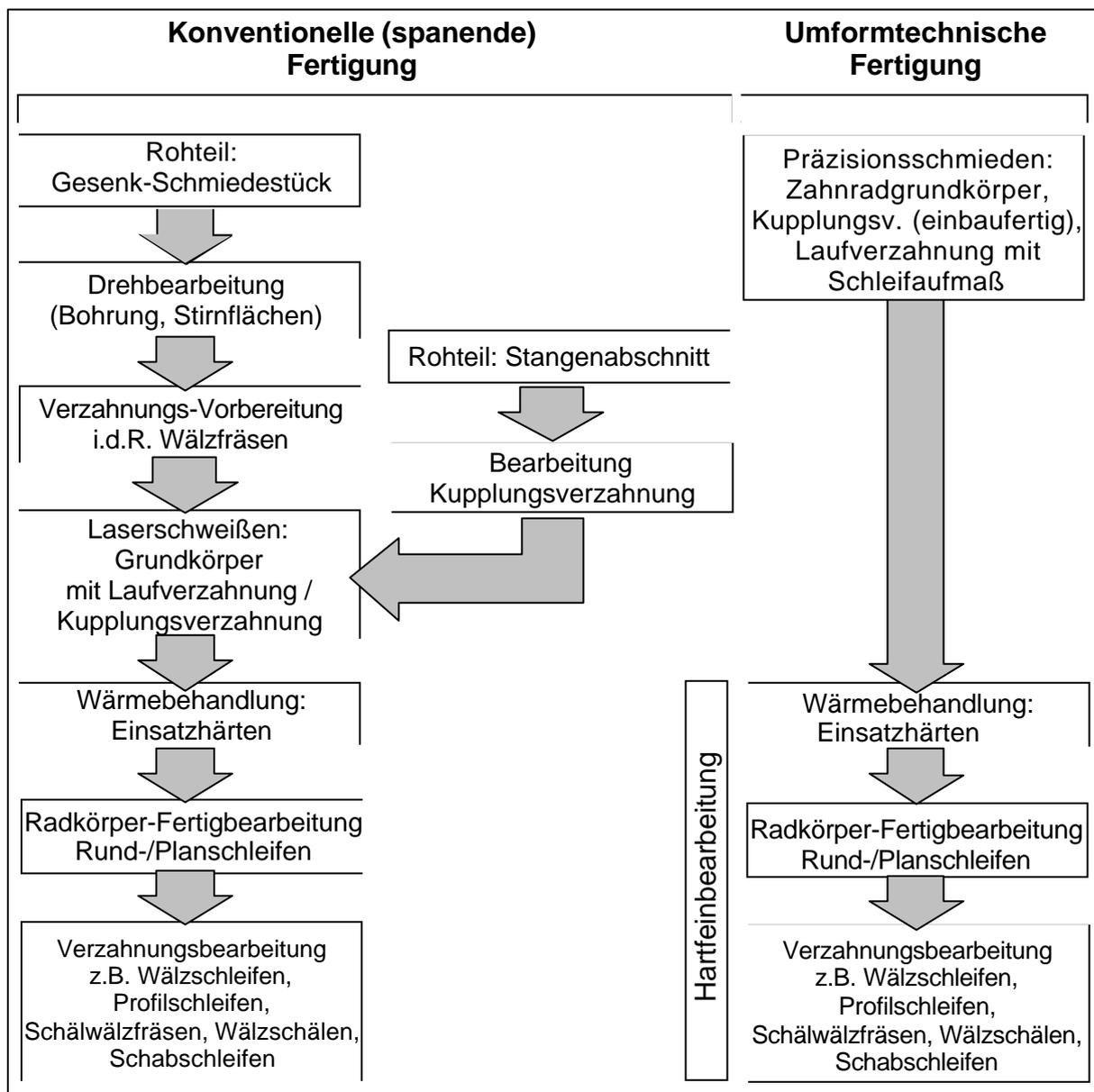


Bild 7.24: Verkürzung der Prozesskette zur Fertigung von Gangrädern durch Präzisionsschmieden für das betrachtete Gangrad

Bei der umformtechnischen Fertigungskette muss die Ausrichtung von Laufverzahnung und Innenbohrung zur Kupplungsverzahnung durch angepasste Einspannbedingungen gewährleistet sein. Als Hartfeinbearbeitungsprozesse können Verfahren zum Wälzschleifen, Profilschleifen, Schälwälzfräsen, Hartschälen sowie zum Schabschleifen (Hartschaben, Feinen, Honen) zum Einsatz kommen. /Baus86/

Kostenvorteile sind bei der alternativen umformenden Bearbeitungsfolge durch die Verkürzung der Prozesskette zu erwarten. Nicht nur die Formung der Verzahnung kann umformtechnisch erfolgen, auch der Aufwand zur Fertigung des Zahnradgrundkörpers kann erheblich verringert werden. So können durch Präzisionsschmieden alle Schritte der Weichbearbeitung substituiert werden (vgl. Bild 7.24). Selbst der Fügenschritt zur Verbindung von Kupplungskranz und Grundkörper mit Laufverzahnung entfällt, da diese durch Ausnutzung der umformtechnischen Fertigungsmöglichkeiten in einem Schritt gefertigt werden können.

Wesentliches Merkmal bei der umformtechnischen Fertigung des Gangrades ist, dass die Fertigstellung der Kupplungsverzahnung vor der Radkörper- und Laufverzahnungsfertigungsbearbeitung stattfindet. Bei der abschließenden Hartfeinbearbeitung müssen die Laufverzahnung und die Funktionsflächen des Grundkörpers zur Kupplungsverzahnung orientiert werden. Für den Abnehmer geschmiedeter Verzahnungen bedeutet dies, dass für die spanende Endbearbeitung eine neuartige Werkstückspanntechnologie eingesetzt werden muss. /Töns97/ Die spanende Nachbearbeitung muss an die geschmiedeten Oberflächen angepasst werden. Probleme können hier schwankende Aufmaße und auf der Oberfläche verbliebene Zunderpartikel bereiten. So werden hohe Anforderungen an Eingangsgrößen des Prozesses wie Rohteiltemperatur und Rohteilmasse gestellt.

Einsatzstähle sind die klassischen Zahnradwerkstoffe, sie benötigen für die Wärmebehandlung eine Aufkohlung ihrer Randschicht. Bei konventionellen spanenden Herstellungsverfahren werden die Zahnräder einer Serie kontinuierlich auf Härteverzüge gemessen. Tritt ein Überschreiten bestimmter Grenzwerte auf, so wird zur Kompensation des Härtefehlers eine Korrektur der Vorverzahnungswerte vorgenommen. Diese Vorgehensweise ist für ein umformendes Verfahren nicht durchführbar, daher sollte durch gleichbleibende Abkühlbedingungen ein reproduzierbares Härteverzugsverhalten präzisionsgeschmiedeter Teile erreicht werden. Somit werden hohe Anforderungen an die Eingangsgrößen des Prozesses wie Rohteiltemperatur und Rohteilmasse gestellt. Präzisionsgeschmiedete Zahnräder weisen jedoch ein günstigeres Verzugsverhalten gegenüber spanend hergestellten Zahnrädern auf /Loom96/.

Das vorgestellte modulare Werkzeugkonzept (vgl. Bild 7.11) wird dem Aspekt der Änderungsflexibilität in hohem Maße gerecht. Im Werkzeugsystem können einzelne formgebende Elemente schnell getauscht werden. So kann eine hohe Variantenvielfalt erreicht werden.

8 Übersicht der Formeln zur Auslegung von Werkzeug und Prozess

In diesem Kapitel werden die wichtigsten Formeln für eine überschlägige Berechnung zur Auslegung von Werkzeug- und Prozess beim Präzisionsschmieden zusammengefasst. Die Anwendung der gelisteten Formeln kann eine genauere Berechnung mit FE-Methoden jedoch nicht ersetzen.

	Anwendung	Formelnummer	Seite
1.	Abschätzung der maximalen Umformkraft; Abschätzung der Schließkraft zur Auslegung des Schließsystems; Auslegung der Armierung der verzahnten Matrize, VDI-Richtlinie 3167 (bei Annahme eines maximalen Innendruckes im Gesenk von $p_{\text{imax}} = 1200 \text{ N/mm}^2$)	6.5	74
2.	Berechnung der Nut der Ausstoßerführung des drehenden Ausstoßers	6.4	63
3.	Berechnung der maximalen Ausstoßerkraft zu Beginn des Ausstoßvorganges	6.6	75
4.	Berechnung der Veränderung des Schleifaufmaßes auf den Zahnflanken bei unterschiedlichen Rohteiltemperaturen in Abhängigkeit von der Geometrie der Verzahnung	6.9	81

1. Abschätzung der maximalen Umformkraft, Schließkraft

Mit dem angenommenen maximalen Gesenkinnendruck, der zur vollständigen Gravurfüllung notwendig ist, kann die entsprechende Umformkraft bestimmt werden. Ein maximaler Gesenkinnendruck am Ende der Umformung beim Zahnradschmieden in Höhe von $p_{\text{imax}} = 1200 \text{ N/mm}^2$ hat sich in vergangenen Schmiedeversuchen am IFUM für erste Abschätzungen als realistisch erwiesen. Aus dem angenommenen Gesenkinnendruck ergibt sich mit der krafteinleitenden Wirkfläche des Dornes die maximale Umformkraft.

Um ein Abfließen des Werkstoffes aus der Gravur zu verhindern, muss der von der Schließplatte aufgebrachte Druck stets größer sein als der über den Napfdorn erzeugte Gesenkinnendruck. Bei Annahme des maximalen Gesenkinnendruckes kann über die wirksame Kontaktfläche zwischen Schließplatte und Werkstück die benötigte Kraft des Schließsystems ermittelt werden.

Die Armierung der verzahnten Gesenkmatrix kann gemäß VDI-Richtlinie 3167 ausgelegt werden.

2. Berechnung der Nut der Ausstoßerführung des drehenden Ausstoßers

Das fertig geschmiedete schrägverzahnte Rad wird über eine schraubenförmige Bewegung des Ausstoßers aus der Matrix entformt. Damit die Reibkräfte zwischen Matrix und Schmiedeteil möglichst während des Ausstoßens und der damit verbundene Verschleiß an den Zahnflanken so gering wie möglich bleiben, muss die Bewegungsrichtung senkrecht zum Normalprofil der Verzahnung bzw. parallel zur Zahnflanke verlaufen.

3. Berechnung der maximalen Ausstoßerkraft zu Beginn des Ausstoßvorganges

Hohe Ausstoßerkraft können die Verzahnung des präzisionsgeschmiedeten schrägverzahnten Rades verformen und zum anderen die verzahnte Matrix beschädigen. Die Höhe der Ausstoßerkraft ist ein Maß für die Belastung der Matrix beim Ausstoßvorgang. Die Ausstoßerkraft entsteht durch Reibung der Oberfläche der Verzahnung des Rades mit der Matrix. In Abhängigkeit von der Geometrie der Verzahnung kann die maximale Ausstoßerkraft vorab berechnet werden.

4. Berechnung der Veränderung des Schleifaufmaßes auf den Zahnflanken bei unterschiedlichen Rohteiltemperaturen in Abhängigkeit von der Geometrie der Verzahnung

Für die Hartfeinbearbeitung nach Wärmebehandlung und Präzisions schmieden ist die Verteilung des Schleifaufmaßes auf den Zahnflanken von Bedeutung. Der Einfluss der Rohteiltemperatur auf die Verteilung des Aufmaßes in Abhängigkeit von der Geometrie der Verzahnung kann berechnet werden. Durch eine Veränderung der Schrumpfung wird das Zahnprofil radial verschoben. Auch die Größe der Änderung des Aufmaßes bei variierenden Rohteilgeometrien je nach Zahngeometrie kann bestimmt werden.

9 Zusammenfassung und Ausblick

Die Vorteile des Präzisionsschmiedens, wie gute Materialausnutzung, kurze Fertigungszeiten und hervorragende technologische Eigenschaften der Bauteile, können auch bei der Herstellung von Zahnrädern für Pkw-Getriebe genutzt werden. Solche Bauteile unterliegen hohen Anforderungen hinsichtlich Geometriege nauigkeit, Lauf ruhe und Tragfähigkeit.

Bisher werden in Pkw-Getrieben zur Geräuschoptimierung Zahnräder mit Hochverzahnungen eingesetzt, die konventionell spanend gefertigt werden. Solche Verzahnungen sind zwar durch Präzisionsschmieden herstellbar, führen aber aufgrund ihrer Geometrie zu einer starken Belastung der Gesenke beim Umform- und Ausstoßvorgang. Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine alternative Verzahnungsgeometrie für die Fertigung durch Präzisionsschmieden ausgelegt und im Prozess untersucht. Die Auslegung wurde auf Basis einer klassischen Pkw-Verzahnung als Referenz durchgeführt, wobei die umformtechnisch optimierte Variante gleiche Qualitäten hinsichtlich Tragfähigkeit und Laufruhe erwarten ließ. Für die umformtechnisch optimierte Verzahnung wurde, um den Werkstofffluss zu erleichtern, der Normaleingriffswinkel vergrößert und die Zahnhöhe verkleinert. Dies führte im Vergleich zur Referenzverzahnung im Umformprozess zu geringeren Umform- und Ausstoßkräften. Somit ergab sich für die umformtechnisch optimierte Verzahnung eine geringere spezifische Werkzeugbelastung, was einen geringeren Verschleiß erwarten lässt und somit einen wirtschaftlichen Vorteil bedeuten kann.

Des Weiteren wurde ein innovatives dreistufiges Werkzeugsystem entwickelt, dass mit einer geeigneten Prozessauslegung die Möglichkeit einer wirtschaftliche Herstellung von schrägverzahnten Zahnrädern durch das Präzisionsschmieden ausgehend von Vollmaterial als Rohteil erlaubt. Zur Auslegung der Stadienfolge mit optimaler Werkzeugvor- und Zwischenformgeometrie mit daraus resultierendem optimalem Werkstofffluss und Gravurfüllungsverhalten wurden FEM-Simulationen genutzt. Die so konzipierten Werkzeuggeometrien und das damit aufgebaute Werkzeuggesamtsystem ermöglichten einen prozesssicheren Serienbetrieb. Als Rohteile wurden zylindrische Abschnitte verwendet, die im Gegensatz zu Rohrabschnitten, wirtschaftlich durch Scheren zu erzeugen sind. Es wurden die Einflüsse variierender zentraler Eingangsgrößen auf das Prozessverhalten und die Bauteilqualität untersucht. Der Prozess ermöglichte die Herstellung der Laufverzahnung in Vorverzahnungsqualität.

Für die umformtechnische Fertigung eines Gangrades mit hinterschnittener Kupplungsverzahnung wurde eine konstruktiv verfahrensgerechte Werkzeugauslegung durchgeführt. Es wurde ein Werkzeugsystem mit radial entformenden Segmenten zur Erzeugung der hinterschnittenen Kupplungsverzahnung entwickelt und konstruiert. Mit diesem Werkzeug war die integrierte Fertigung von Grundkörper mit allen Funktionselementen, von einbaufertiger Kupplungsverzahnung und von Laufverzahnung

mit geringem Schleifaufmaß möglich. Durch die integrierte Fertigung konnten zwischen den Funktionselementen sehr hohe Lagegenauigkeiten erzielt werden. Diese sind für die betrachtete Prozesskette eine wichtige Voraussetzung, da nach Umformung und Wärmebehandlung lediglich eine Hartfeinbearbeitung folgen soll, bei der das präzisionsgeschmiedete Zahnrad in Bezug auf die einbaufertige Kupplungsverzahnung aufgespannt und geringe Aufmaße abgetragen werden. Im Vergleich zur konventionellen Prozesskette konnte die gesamte Weichbearbeitung und Fügeschritte (Laserschweißen der Kupplungsverzahnung auf den Zahnradgrundkörper) durch den Präzisionsschmiedeprozess substituiert werden. Dies führt zu einer erheblichen Verkürzung der Prozesskette und lässt damit wirtschaftliche Vorteile erwarten.

Das Werkzeugsystem für die Herstellung eines Gangrades mit hinterschnittener Kupplungsverzahnung erlaubte die Formung der Kupplungsverzahnung im einbaufertigen Zustand.



Bild 8.1: Im Rahmen dieser Arbeit präzisionsgeschmiedete Zahnräder

Als Ausblick sollten weiterführende Untersuchungen die Steigerung der Standmenge der Schmiedewerkzeuge zum Ziel haben. Es sind geeignete Sprüh- und Kühlstrategien zu entwickeln. Ein weiterer vielversprechender Ansatz ist die Verwendung von keramischen Gesenkeinsätzen. So sind für einen wirtschaftlichen Vergleich zur spanenden Fertigung weiterführende Arbeiten notwendig.

Das Potential der erhöhten dynamischen Festigkeit präzisionsgeschmiedeter Zahnräder sollte quantifiziert werden. Weitere Forschungsthemen sind die Adaption der Werkzeugsysteme auf andere Pressentypen (Kurbelpressen) und Maßnahmen zur weiteren Steigerung der Maß- und Formgenauigkeit der Schmiedeteile.

Des Weiteren ist der mögliche wirtschaftliche Vorteil der umformtechnischen Fertigung im Vergleich zur spanenden Fertigung zu quantifizieren. Zur wirtschaftlichen Bewertung müssen Methoden geschaffen werden, durch die es möglich ist, das Präzisionsschmieden mit anderen Herstellungsverfahren zu vergleichen, wobei Aspekte wie die Wahl der Rohteile, Mehrstufigkeit, Umformaggregat, Anfälligkeit des Prozesses etc. betrachtet werden.

10 Literaturverzeichnis

- /Adam90/ Adams, B.: Verfahren und Fertigungssystem zum Präzisionsschmieden von Zylinderrädern, Dissertation Universität Hannover, 1990
- /Adam90b/ Adams, B.: Präzisionsschmieden von Zahnrädern mit integrierter Randschichthärtung, Schmiede-Journal, September 1990, S. 26
- /Baet69/ Baethge, J.: Drehwegfehler, Zahnfederhärte und Geräusch bei Stirnrädern, Dissertation TU München, 1969
- /Barn97/ Barnreiter, K.; Eichberg, O.: Leichtbaumaßnahmen am manuellen Schaltgetriebe, Automobiltechnische Zeitschrift für Forschung, Entwicklung und Produktion auf dem Gesamtgebiet des Kraftfahrzeuges, Wiesbaden, Vieweg, ISSN 0001-2785, 1997, S. 74-83
- /Bart89/ Bartsch, G.: Anforderungen an umformtechnische Zahnradfertigungsverfahren aus der Sicht des Getriebebaus, Tagungsband, Neuere Entwicklungen in der Massivumformung 06.-07.06.1989, Stuttgart, S. 2/-1
- /Bart93/ Bartsch, G.; Hock, S.; Köpf, P.: Entwicklungstendenzen bei Fahrzeuggetrieben und Perspektiven für ihre Bauteile, Tagungsband, Neuere Entwicklungen in der Massivumformung, Stuttgart, 1993, S. 231
- /Baus86/ Bausch, T.: Zahnradfertigung, Sindelfingen, Expert-Verlag, 1986
- /Beck62/ Beckert, M.; Klemm, H.: Handbuch der metallographischen Ätzverfahren, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig 1962
- /Behr97/ Behrens, B.-A.: Entwicklung eines automatisierten Präzisionsschmiedeprozesses mit integrierter Qualitätsprüfung, Dissertation Universität Hannover, 1997, S. 13-15
- /BLW86/ N.N.: Patentschrift DE 3427 156 C2, Verfahren zum Herstellen eines Synchronsteils mit hinterschnittenen Zähnen, Bayrisches Leichtmetallwerk, 1986
- /BLW86b/ N.N.: Patentschrift DE 3134 857 C2, Verfahren zum Herstellen von Kupplungsteilen, Bayrisches Leichtmetallwerk, 1986
- /Bohn99/ Bohnsack, R.: Schmieden ist oft besser als Spannen, Werkzeugtechnologien für das Präzisionsschmieden, Technica, Ruppertswil, Band 48, Heft 21, 1999, S. 24-29
- /Bohn99b/ Bohnsack, R.: Untersuchungen zum Präzisionsschmieden von Laufverzahnungen, Dissertation, Universität Hannover, 1999
- /Böhm68/ Böhm, H.: Einführung in die Metallkunde, B.I.-Wissenschaftsverlag, Mannheim, Wien, Zürich, 1968

- /Diet02/ Dietze, M.; Hopp, P.; Staudt, K.: Entwicklung präzisionsgeschmiedeter Serienteile, Tagungsband: 17. Umformtechnisches Kolloquium Hannover, 2002, S. 139-142
- /Doeg01/ Doege, E.; Dittmann, J.; Silbernagel, C.: Neue Wege beim Präzisions-schmieden von Pkw-Gangrädern, UTF science, Meisenbach Verlag, Bamberg, 2001, S. 32-38
- /Doeg02/ Doege, E.; Dittmann, J., Silbernagel, C.: Avantages de la forge de precision en plusieurs étapes. la forge, No 7, Janvier 2002, Paris, S. 11-18
- /Doeg98/ Doege, E., Bohnsack, R., Romanowski, C.: Tool technologies for near net shape forgings, International Conference on Forging and related Technology, IMECHE Conference Transactions, 1998
- /Doeg98b/ Doege, E.; Bohnsack, R.: Closed Die Technologies for Hot Forging. Proceedings of the 4th International Precision Forging Conference, 12.-14.10, 1998 Columbus OH USA, Tagungsband Kap. 2.2
- /Doeg99/ Doege, E. et al. : Präzisionsumformung von schrägverzahnten Zahn-rädern, Herstellung, Wärmebehandlung und Prüfung, Abschlußbericht Do 190/92, Universität Hannover 1999, TP IV
- /Doeg99b/ Doege, E.; Bohnsack, R.: Press Concept for the Future in Precision Forging, Advanced Technology of Plasticity Vol. 1, Proceedings of the 6th ICTP, Sept. 19.-24.,1999, S. 203-210
- /Doeg99c/ Doege, E.; Bohnsack, R.: Optimierungspotential beim Schmieden von Zahn-rädern, ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, Jahrgang 94, 1999, S. 201-204
- /Doni03/ Donin, R.; Silbernagel, C.: Optimierte Verzahnungsgeometrien leistungs-übertragender Zahn-räder für die umformtechnische Herstellung, For-schungsvereinigung Automobiltechnik, Frankfurt, 2003
- /Doug98/ Douglas, R.: Guidelines for Precision Hot Forging with Applications, 4th International Precision Forging Conference, October, 12-14, Ohio, 1998
- /Drey00/ Dreyer, G.: Präzisionsschmieden, Entwicklung eines Verfahrens zum Präzisionsschmieden komplexer Antriebsbauteile am Beispiel eines PKW-Ganggrades, Forschungsheft, Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V., 2000
- /Esch70/ Eschelbach, R.: Das Gesenkformen I, Springer-Verlag, Berlin, Heidel-berg, New-York, 1970
- /Felt99/ Felten, K.: Das aktuelle Grundwissen über Herstellung und Prüfung von Zahn-rädern, expert verlag, 1999, Renningen-Malmsheim
- /Gall93/ Gallade, U.; Fleischer, H.: Weniger Spanen, Gratlosschmieden einbaufertiger Funktionsflächen senkt Herstellkosten, Maschinenmarkt, Band 99, Heft 35, 1993, S. 26-31

- /Geig90/ Geiger, R.; Hänsel, M.: Fließpresstechnik 1990 in Europa, Anwendungen, Stand der Technik, Entwicklungen. VDI-Berichte Nr. 810, 1990, S. 297-336
- /Ger84/ Gerber, H.: Innere dynamische Zusatzkräfte bei Stirnradgetrieben - Modellbildung, innere Anregung und Dämpfung, Dissertation TU München, 1984
- /Grav96/ Gravel, G.: Beurteilung abbildend hergestellter Stirnzahnräder mit Hilfe der Koordinatenmeßtechnik, Dissertation, Universität Hannover, 1996
- /Gutm98/ Gutmann, P.: Precision Formed Powertrain Components, 4th International Precision Forging Conference, October, 12-14, Ohio, 1998
- /Hage01/ Hagenmeyer, T.; Rinderknecht, S.; Rühle, G.: Entwicklungstendenzen in der Getriebetechnik, VDI-Berichte Nr. 1610, VDI-Verlag, Düsseldorf, 2001, S. 4-5
- /Haus67/ Hausen, H. (Herausg.): Landolt-Börnstein, Zahlenwerte und Funktionen aus Physik, Chemie, Astronomie, Geophysik und Technik, Band 4, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New-York, 6. Auflage, 1967
- /Herb99/ Hertz, R.: Entwicklungen in der Schmiedetechnik, Voraussetzungen für Innovation und Wettbewerbsfähigkeit, Neuere Entwicklungen in der Massivumformung, Stuttgart, 19./20. Mai, 1999
- /Hirs00/ Hirschvogel, M.: Zukunftsperspektiven der Schmiedeindustrie, Schmiedejournal, Hagen, 2000, S. 3
- /Hirs99/ Hirschvogel, M.: Technische und wirtschaftliche Aspekte der Warm-, Halbwarm- und Kaltumformung, Neuere Entwicklungen in der Massivumformung, Stuttgart, 19./20. Mai, 1999
- /Höhn97/ Höhn, B.-R.: Gestaltung von Verzahnungsgeometrien für die Umformtechnik. 3. Umformtechnisches Kolloquium, Darmstadt, 12. März, 1997
- /IDS02/ <http://www.ids.wsu.de> (Homepage des Industrieverbands Deutscher Schmieden, IDS), Okt. 2002
- /Jäni85/ Jäniche, W.; Dahl, W.; Klärner, H.-F. et al: Werkstoffkunde Stahl, Band 2 Anwendung, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New-York, 1985
- /Knab77/ Knabel, H.: Geräusche und Schwingungen an Stirnradgetrieben - Untersuchung geometrischer Einflüsse bei hohen Drehzahlen und Belastungen. Dissertation TU München, 1977
- /Koll90/ Koll, W.: Kaltfließpressen von Bauteilen mit Verzahnungen, Dissertation RWTH-Aachen, 1990
- /Köni86/ König, W.; Leube, H.; Heinze, R.: Taumelpressen von geradverzahnten Zylinderrädern, Industrieanzeiger 91, 1986
- /Köni88/ König, W.; Salje, H.; Röber, G.: Tragfähigkeit pulvergeschmiedeter Zahnräder, Industrie-Anzeiger 25, 1988, S. 16-20

- /Köni90/ König, W.; Röber, G.: Powder Forging of Helical Gears for Car Manual Gear Boxes – Concept and Properties, Metal Powder Report, April 1990, S: 269, 272 -273
- /Kopp98/ Kopp, R.; Wiegels, H.: Einführung in die Umformtechnik, Verlag der Augustinus Buchhandlung, Aachen, 1998
- /Lang77/ Lange, K.; Meyer-Nolkemper, H.: Gesenkschmieden, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1977
- /Lauf91/ Laufer, M.: Untersuchungen über das Kaltfließpressen gerad- und schrägverzahnter Stirnräder, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1991
- /Lehn83/ Lehnhoff, T. F.; Chen, H.; Ardayfio, D.: Surface Durability of Forged and Machined Steel Gears. ASME 83-DE-6, 1983
- /Lind83/ Lindner, H.: Präzisionsschmieden, Werkstatt und Betrieb, 116, 1983, S. 605-609
- /Loom96/ Looman, J.: Zahnradgetriebe: Grundlagen, Konstruktionen, Anwendungen in Fahrzeugen, Springer, Berlin, Heidelberg, New-York, Barcelona, Budapest, Hong Kong, London Mailand, Paris, Santa Clara, Singapur, Tokio, 1996, S. 146, 147, 154-157
- /Lütt96/ Lüttel, N.: Ein Beitrag zur Wirkflächenreibung beim Kaltfließpressen von verzahnten Werkstücken, Shaker Verlag, 1996
- /Mage79/ Mages, W.: Vorteilhafte Anwendung neuzeitlicher Umformverfahren in der Zahnrad- und Getriebefertigung, VDI-Bericht 332, 1979, S. 97-106
- /Müll91/ Müller, R.: Schwingungs- und Geräuschanregung bei Stirnradgetrieben. Dissertation TU München, 1991.
- /Näge95/ Nägele, H.: Simulation des Herstellungsprozesses präzisionsgeschmiedeter Zahnräder mit der Finite-Elemente Methode, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1995, S. 2
- /Naok90/ Naoki, I.: Forging Die Device for Gear, Patent Japan, JP 225 813 0, 1990
- /Nebe99/ Neber, R.: Kaltfließpressen von Verzahnungen und Kupplungsprofilen, Neuere Entwicklungen in der Massivumformung, Stuttgart, 19./20. Mai, 1999
- /NN95/ N.N.: Schmiedeteile, Bedeutung, Gestaltung, Herstellung, Anwendung, Verlag Industrieverband Deutscher Schmieden e. V. (IDS), Hagen, 1995
- /Ohok88/ Ohoka Forge, Japan, Geschmiedetes Zahnrad für ein Getriebe, DE 3901501, Patent Japan: JP 63-20374, 1988
- /Pedd99/ Peddinghaus, J.: Geschmiedete Fahrwerksbauteile, Werkstatt und Betrieb, Jahrg. 132, Carl Hanser Verlag, München 1999, S. 17-18
- /Roth98/ Roth, K.: Zahnradtechnik – Evolventen – Sonderverzahnungen, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 1998, S. 549

- /Ruda00/ Rudau, E.: Deutsche Gesenkschmiedeindustrie gerüstet für die Zukunft, Schmiede-Journal, März 2000, S. 32-22
- /Sade92/ Sadeghi, M.-H.; Dean, T. A.: The Ejection of Precision-Forged Straight and Helical Spur Gear Forms. Journal of Materials Processing Technology, 31, 1992, S. 147-160
- /Sama75/ Samanta, K.; Ypsilanti, M.: Apparatus and method for cold extrusion of gears, United States Patent 3910091, 1975
- /Satt97/ Sattelberger, K.: Schwingungs- und Geräuschanregung bei ein- und mehrstufigen Stirnradgetrieben, Dissertation TU München, 1997, S. 48-51
- /Schl93/ Schliephake, U.: Analyse des Werkzeugverschleißes beim Gesenkschmieden, Dissertation, Universität Hannover, 1993, S. 6-10
- /Schm82/ Schmöckel, D.; Kübert, M.: Urformen und Umformen von Zahnrädern, Werkstatt und Betrieb 115, 1982, S. 405-411
- /Schm93/ Schmieder, F.: Beitrag zur Fertigung von schrägverzahnten Stirnrädern durch Querfließpressen, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New-York, 1993
- /Töns97/ Tönshoff, H. K.; Türich A.; Jagodzinski, V.: Bohrungsbearbeitung präzisionsgeschmiedeter Stirnzahnräder, Antriebstechnik 36, Nr. 9, 1997, S. 78-81
- /Tsuc98/ Tsuchida, Y.; Inoue, T.; Nakajima, K.; Hosoi, Y.: Contribution to the Environmental Issues by Controlling Hot Deformation Processes in Steel Development for Fossil Power Generation. Proceedings of the International Workshop on Environmental and Economic Issues in Metal Processing, Nov. 25-27, 1998, Nara, Japan, S. 65-73
- /VDA99/ N.N.: VDA, Verband der Automobilindustrie e. V.: Jahresbericht 1999, Frankfurt, 1999
- /VDI2127/ N.N.: VDI-Richtlinie 2127, AWF-Fachgruppe Getriebetechnik: Getriebetechnische Grundlagen, Begriffsbestimmungen der Getriebe, Berlin, Beuth Verlag, 1962
- /VDIR86/ N.N.: Vorgespannte Presswerkzeuge für das Kaltumformen, VDI-Richtlinie 3176, VDI-Verlag Düsseldorf, 1986
- /Vier98/ Vieregge, K.: VDI-Berichte Nr. 1382, VDI-Verlag, Düsseldorf 1998
- /Voss87/ Vossen, K.: Pulverschmieden von gerad- und schrägverzahnten Zylinderrädern, Dissertation RWTH Aachen, 1987
- /Walt97/ Walton, D.; Dean, T.A.: Comparative Bending Fatigue Strength of precision forged Spur Gears, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 1997, p. 293-299

- /Weck98/ Weck, M.: Werkzeugmaschinen, Maschinenarten und Anwendungsbereiche, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New-York, 1998, S. 359
- /West96/ Westerkamp, C.: Präzisionsschmieden verzahnter Antriebs Elemente am Beispiel schrägverzahnter Zahnräder, Dissertation Universität Hannover, 1996
- /West97/ Westerkamp, Ch.; Weißmann, G.: Präzisionsumformung - eine Schlüsseltechnologie für die Antriebstechnik, Springer-VDI-Verlag, Düsseldorf, 1997, S. 72 -74
- /West97b/ Westkämper, E.: Arbeitsorganisation und Unternehmenskonzepte der deutschen Schmieden im internationalen Vergleich. Wirtschaftsfaktor Umformtechnik, 4. Sächsische Fachtagung Umformtechnik, Fraunhofer Institut für Werkzeugtechnik und Umformtechnik IWU Chemnitz, TU Chemnitz, 5.-6. November 1997, S. 359-377
- /Wieb00/ Wiebe, P.: Ein Beitrag zur Herstellung von Schrägstirnrädern mit lagegenauer Bohrung durch einen zweistufigen Umformprozess, Dissertation Universität-Gesamthochschule Paderborn, 2000
- /Yosh98/ Yoshimura, H.; Tanaka, K.: Precision Forging of Aluminium and Steel, 4th International Precision Forging Conference, October, 12-14, Ohio, 1998
- /Zerr97/ Zerres, E.: Leichter, effizienter, genauer, Trends in der Massivumformung, Fertigung, Landsberg, Band 25, Heft 10. 1997, S. 36-38