

Dirk Odening, Mathias Meyer, Andreas Klassen, Anas Bouguecha und
Bernd-Arno Behrens

Inhaltsverzeichnis

2.1	Bauteilspektrum	20
2.2	Werkstoffspektrum	20
2.3	Prozess- und Werkzeugauslegung	22
2.3.1	Funktions- und prozessgerechte Bauteilgestaltung	23
2.3.2	Werkzeugkonzepte	24
2.3.3	Stadienplanung beim Präzisionsschmieden	31
2.3.4	Werkzeugkorrektur	36
2.4	Prozesssimulation	41
2.4.1	Grundlagen der FEM	42
2.4.2	Aufbau von FE-Systemen	43
2.4.3	Standardanwendungen	45
	Literatur	48

Nach DIN 8580 versteht man unter dem Begriff „Umformen“ das Fertigen durch bildsames oder plastisches Ändern der Form eines festen Körpers. Hierbei werden sowohl die Masse als auch der Stoffzusammenhalt des zu bearbeiteten Körpers beibehalten. Für die Umformung metallischer Werkstoffe ergänzt SIEGERT diese Definition um die gezielte Beeinflussung der Oberflächen- und Produkteigenschaften durch den Umformvorgang.

Die teilweise oder vollständige umformtechnische Umsetzung von Fertigungsprozessen bietet aufgrund verschiedener technologischer, konstruktiver sowie produktionstech-

D. Odening (✉) · A. Klassen · A. Bouguecha · B.-A. Behrens
Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen, Leibniz Universität Hannover,
An der Universität 2, 30823 Garbsen, Deutschland
E-Mail: dirk.odening@gmx.de

D. Odening
Am Schelmenbusch 4, 76307 Karlsbad, Deutschland

M. Meyer
Institut für Integrierte Produktion Hannover GmbH, Hollerithallee 6,
30419 Hannover, Deutschland



Abb. 2.1 Zahnradrohling geschmiedet aus dem Vollen gefräst [Lao97]

nischer und ökonomischer Gesichtspunkte diverse Vorteile. Aufgrund ihrer guten mechanischen Eigenschaften werden Schmiedeteile in sicherheitsrelevanten Bereichen hoher statischer und dynamischer Belastungen eingesetzt. Sie eignen sich insbesondere für kraft- und bewegungsübertragende Komponenten im Fahrzeug- und Turbinenbau [Imu08]. Neben den guten mechanischen Eigenschaften zeichnen sich geschmiedete Bauteile des Weiteren durch eine reduzierte Verzugsneigung in der abschließenden Wärmebehandlung aus [Sil03]. In Zeiten der globalen Energie- und Rohstoffverknappung und gesellschaftspolitischen Forderungen nach einem sparsamen Umgang der natürlichen Ressourcen gewinnen umformende Fertigungsverfahren immer mehr an Bedeutung. Je nach eingesetzter Prozess- und Anlagentechnologie müssen für die Erzeugung von 1 kg Kohlenstoffstahl 18 MJ bis 36 MJ aufgewendet werden [Doe10]. Nach TEKKAYA entfallen für warmumgeformte Stahlbauteile bis zu 90 % der insgesamt aufzuwendenden Energie bereits auf den grundlegenden Urformprozess zur Stahlerzeugung [Tek09]. HERBERTZ beziffert bezogen auf den Primärenergiebedarf für die Herstellung von Massivbauteilen ca. zwei Drittel auf die Vormaterialerzeugung und zirka ein Drittel auf die Weiterverarbeitung in den Unternehmen der Warm- und Massivumformung [Her11]. Durch die gute Rohstoffausnutzung umformtechnischer Fertigungsverfahren ergibt sich somit trotz erhöhtem Energiebedarf zur Rohteilerwärmung und Umformung insgesamt eine positive Energiebilanz. In einer vergleichenden Betrachtung am Beispiel eines konventionell gespannten und geschmiedeten Rücklaufgrades zeigt LAOURINE eine mögliche Materialeinsparung von 43 % durch ein verringertes Rohteilvolumen und eine verbesserte Werkstoffausnutzung der umformtechnischen Fertigungsroute auf. Zusätzlich gelingt es durch die zeitgleiche Ausformung einer funktionsgerechten Stirnkontur im Übergangsbereich zwischen Nabe und Zahnkranz das spätere Bauteilgewicht ohne zusätzlichen Fertigungsaufwand um 22 % gegenüber der einfach gespannten Variante zu reduzieren (s. Abb. 2.1).

Im Vergleich zu der konventionellen Prozesskette mit Vorschmieden und spanender Weichbearbeitung der Bauteil- bzw. Verzahnungskontur (s. Abb. 2.1) ist durch Einsatz des

gratlosen Präzisionsschmiedens neben der Erhöhung der Materialeffizienz eine Einsparung von Fertigungsschritten und eine Verkürzung der gesamten Prozesskette zu erreichen.

Nach dem Formgebungsprozess ist oftmals nur noch eine abschließende Hartfeinbearbeitung definierter Funktionsflächen mit minimalen Spanvolumina erforderlich. Die Substitution der spanenden Weichbearbeitung und die hohen Prozesstemperaturen von bis zu 1250 °C beim Schmieden von Stahlwerkstoffen ermöglichen eine integrierte Wärmebehandlung der geschmiedeten Bauteile direkt aus der Schmiedewärme. Durch die Vermeidung einer Grobkornbildung aufgrund sekundärer Rekrystallisation bei Wiedererwärmung und die Ausbildung eines sehr feinen Martensits während der Abschreckbehandlung können festigkeitsoptimierte Gefügestände in den Schmiedeteilen erreicht werden (s. Kap. 4).

Neben der zumeist im Vordergrund stehenden äußeren Formgebung des Werkstoffs können die werkstoffimmanenten Materialeigenschaften, wie der Faserverlauf und die Gefüge- und Kornstruktur, durch den Formgebungsprozess positiv beeinflusst werden. Der Erhalt der grundsätzlichen Werkstoff- und Faserstruktur sowie die verformungsinduzierte Kornfeinung beeinflussen die bei Wärmebehandlung ablaufenden Umwandlungs- und/oder Ausscheidungsvorgänge und tragen zur Festigkeitssteigerung bei [Lan93a]. Durch eine weitestgehende Entkopplung von den fertigungsbedingten Randbedingungen konkurrierender spanender Fertigungsverfahren (Zustellwege, Werkzeugausläufe etc.) begünstigen umformtechnische Fertigungsverfahren eine funktions- und belastungsoptimierte Bauteilgestaltung [Wit11]. Hierdurch sind neben einer verbesserten Funktionalität eine weitere Steigerung der Leistungsfähigkeit bei unveränderter Baugröße oder verringerte Abmessungen bei gleichbleibender Festigkeit möglich. Dies unterstützt den Trend zum „Downsizing“ und Leichtbau [Ado95].

Als ein wesentliches Klassifizierungsmerkmal wird die Umformtemperatur herangezogen. Eine vorherige Erwärmung des Umformgutes führt zu einer deutlichen Reduzierung der erforderlichen Umformkräfte bei gleichzeitiger Erhöhung des Umformvermögens. Traditionell wird zwischen Kalt-, Halbwarm- und Warmumformung unterschieden (s. Abb. 2.2). Stahlwerkstoffe werden im Allgemeinen oberhalb 1000 °C warm umgeformt [Doe10].

Nach DIN 8583-1 wird das Gesenkformen oder Gesenkschmieden als Druckumformen mit gegeneinander bewegten Formwerkzeugen (Gesenken) definiert. Es wird zwischen Gesenkschmieden mit und ohne Grat unterschieden. Während bei Gesenkschmiedeprozessen mit Grat überschüssiger Werkstoff durch einen Gratspalt abfließen kann und in einem nachfolgenden Fertigungsschritt entfernt werden muss, erfolgt das Gesenkschmieden ohne Grat im vollständig geschlossenen Gesenk. Das gratlose Schmieden zeichnet sich insbesondere durch die optimale Werkstoffausnutzung, den geringen Nachbearbeitungsaufwand sowie den gänzlich geschlossenen Faserverlauf der Schmiedeteile aus.

Gesenkschmiedeteile aus Stahl werden überwiegend nach DIN EN 10243-1 toleriert und hinsichtlich ihrer Fertigungstoleranzen klassifiziert. Je nach gestellten Genauigkeitsanforderungen wird zwischen der Schmiedegüte „F“ für allgemeine Anwendungsfälle und „E“ für Schmiedeteile mit erhöhten Genauigkeitsanforderungen unterschieden. Eine weiter-

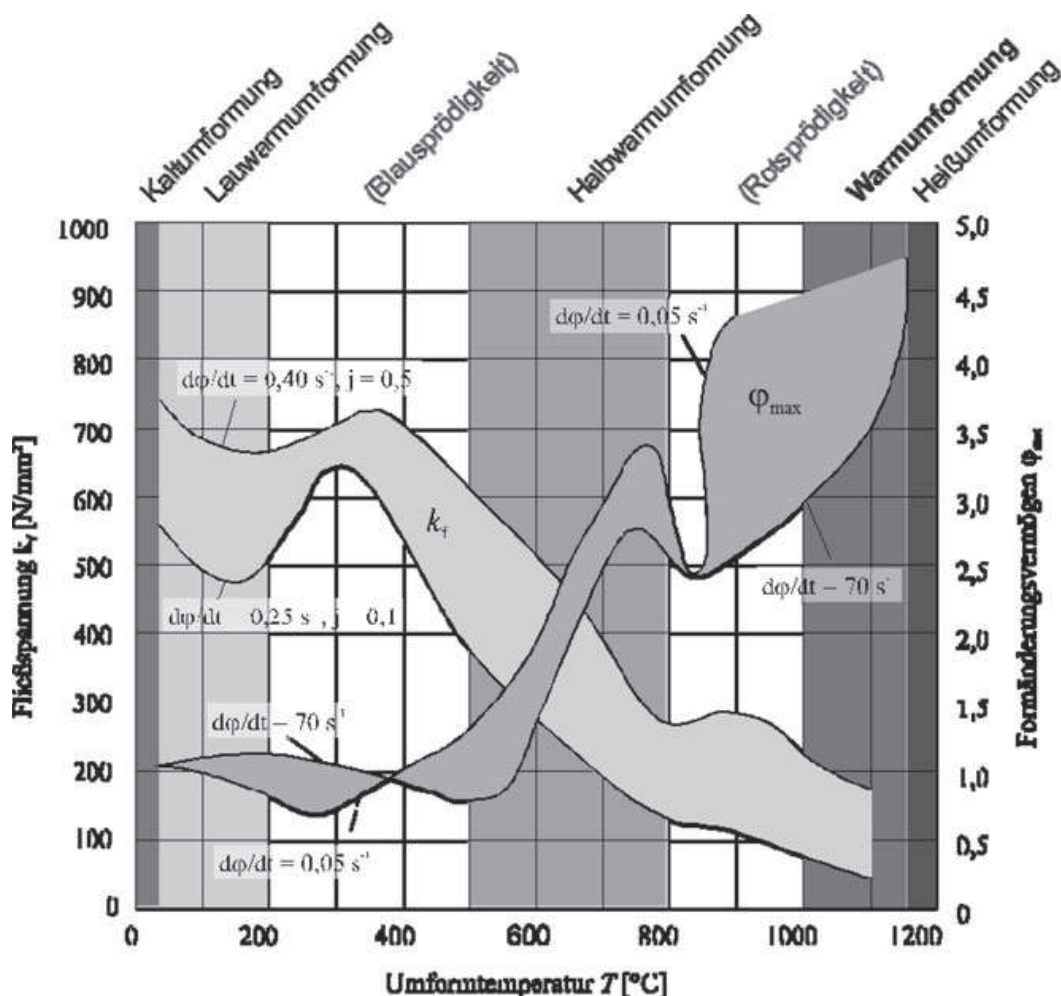


Abb. 2.2 Fließkurve/Formänderung über der Umformtemperatur von Schmiedestählen [Doe10]

führende Klassifizierung der Fertigungsgenauigkeiten erfolgt in der DIN EN ISO 286 nach dem sogenannten ISO-Toleranzsystem (IT). Hiernach entsprechen die klassischen Schmiedegüten „F“ und „E“ je nach Nennmaß den Grundtoleranzgraden IT 16 bis IT 14. Durch Erhöhung des technischen Aufwands können die Fertigungsgenauigkeiten von Schmiedeteilen weiter gesteigert werden. Durch ein Gesenkschmieden mit anschließendem Maßprägen (Genauschieden) sind Fertigungstoleranzen bis IT 10 erreichbar. Durch weitere Maßnahmen können Präzisionsschmiedeprozesse mit Fertigungstoleranzen bis IT 7 umgesetzt werden. Die erreichbaren Genauigkeiten sind hierbei mit denen spanender Schlichtarbeitsgänge vergleichbar. In Tab. 2.1 sind die erreichbaren Fertigungstoleranzen verschiedener Fertigungsverfahren gegenübergestellt.

Die erhöhten Ansprüche an die Maß- und Formgenauigkeiten von Präzisionsschmiedeteilen stellen erhöhte Anforderungen an die Werkzeug- und Prozessgestaltung. Hierzu sind insbesondere:

- eine genaue Werkzeugauslegung und -fertigung,
- eine hohe Volumen- und Geometriegenauigkeit,

Tab. 2.1 Fertigungstoleranzen verschiedener Fertigungsverfahren im Vergleich [Doe10, Imu08]

Verfahren	ISO-Toleranzreihe (IT) entspricht DIN ISO 286 Teil 1									
	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Gesenkschmieden (Schmiedegüte E u. F)										
Genauschmieden (Gesenkschmieden und Maßprägen)										
Präzisionsschmieden										
Warmfließpressen										
Halbwarmfließpressen										
Kaltfließpressen										
Drehen										

- eine genaue Temperaturführung,
- eine genaue Werkzeug- bzw. Stößelführung,
- eine genaue Prozessführung,
- eine hohe Prozessstabilität sowie eine hohe Reproduzierbarkeit der Prozess- und Maschinenparameter

zu nennen [Sil03, Doe10].

Die Steigerung der Präzision von Umformteilen in Bezug auf Form-, Lage- und Maßgenauigkeit sowie die Verbesserung der Oberflächengüte haben zur Folge, dass immer mehr Funktionselemente oder komplette Werkstücke ohne oder mit nur geringer Nachbearbeitung einbaufertig hergestellt werden können. Das Fertigungsverfahren Umformen steht damit vielfach in Konkurrenz zu gesamten Fertigungsfolgen und nicht mehr nur zu einzelnen Fertigungsprozessen [Klo06].

2.1 Bauteilspektrum

Die Untersuchungen im Sonderforschungsbereich 489 stützen sich auf Demonstratorbauteile aus der Gruppe der rotationssymmetrischen und länglichen Bauteile des Motoren-, Triebwerks- und Getriebebaus. In der Anfangsphase wurden vorerst kompakte Demonstratorbauteile am Beispiel einer schrägverzahnten Zahnradgeometrie sowie einer Elementarzelle einer Kurbelwellengeometrie betrachtet. Im weiteren Verlauf wurde die Komplexität der Geometrie erhöht und das Bauteilspektrum auf Langteile in Form einer Ritzelwelle sowie einer Ein- und Zweizylinderkurbelwellen erweitert. In Abb. 2.3 und 2.4 sind die Demonstratorbauteile mit den wesentlichen technischen Daten aufgeführt.

2.2 Werkstoffspektrum

Für Schmiedeteile werden mit einem Anteil von 97 % überwiegend Stahlwerkstoffe eingesetzt [Imu08]. Stähle weisen eine gute Kalt- und Warmumformbarkeit auf. Die mechanischen Eigenschaften von Stahlwerkstoffen werden maßgeblich durch den Kohlenstoffgehalt bestimmt. Durch die Zugabe weiterer Legierungselemente und eine gezielte Wärmebehandlung lassen sich Eigenschaften, wie Härte, Streckgrenze, Zugfestigkeit, Bruchdehnung, Zähigkeit, Dauerschwingfestigkeit, Warmfestigkeit, Zerspanbarkeit und Korrosionsbeständigkeit des Stahls vielseitig variieren und an die jeweils gestellten Anforderungen anpassen. Neben der grundlegenden Unterscheidung zwischen unlegierten und legierten Qualitäts- und Edelstählen sowie nichtrostenden Stählen erfolgt die weitere Klassifizierung über die Einteilung nach den jeweiligen Verarbeitungs- und Gebrauchseigenschaften. Für Gesenkschmiedestücke werden je nach Verwendungszweck vorwiegend Baustähle sowie Einsatz- und Vergütungsstähle eingesetzt.

Baustähle mit einem Kohlenstoffgehalt zwischen 0,02 und 0,6 % sind meist unlegiert und nur teilweise wärmebehandelt. Je nach Kohlenstoffgehalt können Zugfestigkeiten von 350 bis 900 N/mm² erzielt werden. Baustähle finden typischer Weise im allgemeinen Stahl- und Maschinenbau Anwendung. Die Verarbeitungs- und Gebrauchseigenschaften von Einsatz- und Vergütungsstählen werden maßgeblich durch ihren Kohlenstoffgehalt bestimmt. Während Einsatzstähle aufgrund ihres geringen Kohlenstoffgehalts erst durch ein zusätzliches Aufkohlen gezielt im Bereich der Randschicht gehärtet werden können, weisen Vergütungsstähle mit einem Kohlenstoffgehalt von ca. 0,3 bis 0,6 % bereits einen ausreichenden Kohlenstoffanteil zum Vergüten in die Martensit- oder Bainitstufe auf. Dies ermöglicht eine integrierte Wärmebehandlung aus der Schmiedewärme (s. Kap. 4). Je nach Legierungszusammensetzung und Wärmebehandlung können Einsatz- und Vergütungsstähle Zugfestigkeiten von 500 bis 1500 N/mm² erreichen. Sie werden laut DIN EN 10020 daher vielfach für hochbelastete kraft- und bewegungsübertragende Komponenten im Getriebebau eingesetzt [Lan77, Bei01].



Schrägverzahntes Zahnrad

Normalmodul	m_n	2
Zähnezahl	z	37
Teilkreisdurchmesser	d	78,75 mm
Kopfkreisdurchmesser	d_k	82,75 mm
Fußkreisdurchmesser	d_f	73,75 mm
Eingriffswinkel	α	20°
Schrägungswinkel	β	20°

Ritzelwelle

Normalmodul	m_n	2
Zähnezahl	z	30
Teilkreisdurchmesser	d	63,85 mm
Kopfkreisdurchmesser	d_k	67,85 mm
Fußkreisdurchmesser	d_f	58,85 mm
Eingriffswinkel	α	20°
Schrägungswinkel	β	20°

Ritzelwelle mit Keilverzahnung

Ritzelverzahnung:

Normalmodul	m_n	2
Zähnezahl	z	37
Teilkreisdurchmesser	d	78,75 mm
Kopfkreisdurchmesser	d_k	82,75 mm
Fußkreisdurchmesser	d_f	73,75 mm
Eingriffswinkel	α	20°
Schrägungswinkel	β	20°

Keilverzahnung:

Zähnezahl	z	7
Kopfkreisdurchmesser	d_k	35 mm
Fußkreisdurchmesser	d_f	26 mm



Vorstufe

Fertigstufe

Abb. 2.3 Verzahnungen tragende Demonstratorbauteile des SFB 489: Schrägverzahntes Zahnrad, Ritzelwelle und Ritzelwelle mit Keilverzahnung

Im Rahmen des Forschungsprogramms des Sonderforschungsbereiches wurden verschiedene niedrig und höher legierte Schmiedestähle eingesetzt. Neben dem Vielfach zur konventionellen Zahnradfertigung verwendeten Einsatzstahl 16MnCr5 fanden die verschiedenen Vergütungsstähle C45, Cf53, C60 und 42CrMo4 Verwendung. Des Weiteren kam der für Getriebebauteile bisher eher untypische Wälzlagerstahl 100Cr6 zum Einsatz.



Abb. 2.4 Elementarzelle, 1- und 2-Zylinderkurbelwelle

2.3 Prozess- und Werkzeugauslegung

Die erhöhten Ansprüche an Maß- und Formgenauigkeit präzisionsgeschmiedeter Bauteile stellen erhöhte Anforderungen an die Prozessauslegung und -führung sowie die eingesetzten Schmiedewerkzeuge und Umformmaschinen. Präzisionsschmiedeprozesse reagieren empfindlich auf schwankende Prozessgrößen. Bereits geringfügige Änderungen im Schmiedeprozess haben Einfluss auf den Prozessablauf und die letztendliche Bauteilqualität. In Abb. 2.5 ist eine Auswahl der Haupteinflussgrößen auf das Schmiedeergebnis exemplarisch in Form eines Ishikawa-Diagramms zusammengefasst dargestellt.

Neben den dargestellten direkten Abhängigkeiten bestehen auch Wirkzusammenhänge zwischen den einzelnen Einflussgrößen. Die Kenntnis der komplexen Wechselbeziehungen zwischen den Eingangsgrößen und den resultierenden Prozessgrößen ermöglicht die erreichbare Fertigungsgenauigkeit von Schmiedeprozessen deutlich zu steigern. Dazu ist eine funktions- und prozessgerechte Bauteilgestaltung und eine hieran angepasste Werkzeugauslegung und Prozessführung notwendig. Neben der prozessgerechten Ausgestaltung der Bauteilgeometrie (s. Abschn. 2.3.1) ist die Entwicklung geeigneter Werkzeugkonzepte (s. Abschn. 2.3.2) zur genauen Umsetzung der erforderlichen Stofffluss von besonderer Bedeutung. Der Stofffluss erfolgt in Abhängigkeit der Schmiedeteilform in einer oder mehreren Stufen. Die Auslegung dieser Stufen erfolgt in einer Stadienplanung. Durch eine angepasste Stadienplanung kann eine optimale Verteilung des Volumens vor der Fertigschmiedung erfolgen. Damit wird dem komplexen Stofffluss bei komplizierten Schmiedeteilen zur Erreichung der Formfüllung Rechnung getragen. Des Weiteren

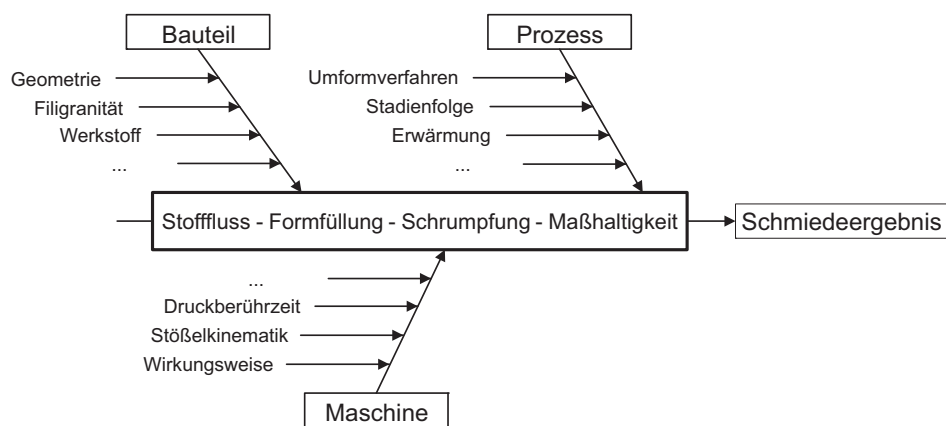


Abb. 2.5 Ishikawa-Diagramm mit Einflussgrößen auf das Schmedeergebnis

können durch eine dem Bauteil angepasste Stadienplanung die benötigten Umformkräfte reduziert und verfahrenstechnische Grenzen zur Vermeidung von Schmedefehlern, wie Falten oder Risse, eingehalten werden [Doe10] (s. Abschn. 2.3.3). Zur Steigerung des Formänderungsvermögens erfolgt die Massivumformung von herkömmlichen Stahlwerkstoffen bei Rohteiltemperaturen von bis zu 1250 °C. Mit steigender Temperatur erhöht sich die Schrumpfung der warm ausgeformten Bauteile. Dieses beeinträchtigt die erreichbare Bauteilgenauigkeit und ist durch eine Korrektur der formgebenden Matrize zu kompensieren (s. Abschn. 2.3.4).

2.3.1 Funktions- und prozessgerechte Bauteilgestaltung

Die funktions- und prozessgerechte Auslegung und Gestaltung der Bauteilgeometrie bestimmen das Fließ- und Formfüllungsverhalten und somit das sich einstellende Schmedeergebnis. Verzahnungsgeometrien mit großem Modul und Eingriffswinkel begünstigen das Fließ- und Formfüllungsverhalten. Hierbei bestimmt insbesondere die Wahl des Eingriffswinkels das Oberflächen-Volumen-Verhältnis im Bereich der Verzahnung und somit das Auskühl- und resultierende Fließverhalten im Schmedeprozess [SFB02, Dre02, Sil03]. Neben der filigranen Verzahnungsgeometrie wirkt sich auch die Gestalt des Zahnradgrundkörpers unmittelbar auf das Umformverhalten aus. Die Zunahme der Reibkontaktflächen führt neben erhöhten Reibungsverlusten auch zu einem verstärkten Wärmetransfer zwischen Werkstück und Werkzeug. Dieses zieht insgesamt eine Veränderung der Umformbedingungen nach sich. Neben den Kontaktbedingungen beeinflusst die grundlegende Bauteilgeometrie stattfindende Wärmeausgleichsvorgänge im Umformgut und somit die resultierenden Wärme-/Temperaturverteilung zum Zeitpunkt der Formgebung. Am Beispiel einer schrägverzahnten Zahnradgeometrie zeigt sich eine Zunahme der radialen Qualitätsgröße „Kopfkreisdurchmesser“ bei stärkerer Konturierung des Zahnradgrundkörpers trotz identischer Rohteilmasse und -temperatur. Dieses Verhalten ist auf eine geminderte Bauteilschrumpfung aufgrund eines verstärkten Wärmeverlusts im Schmedeprozess zurückzuführen. In Abb. 2.6 ist die Abhängigkeit der radialen Qualitätsgröße

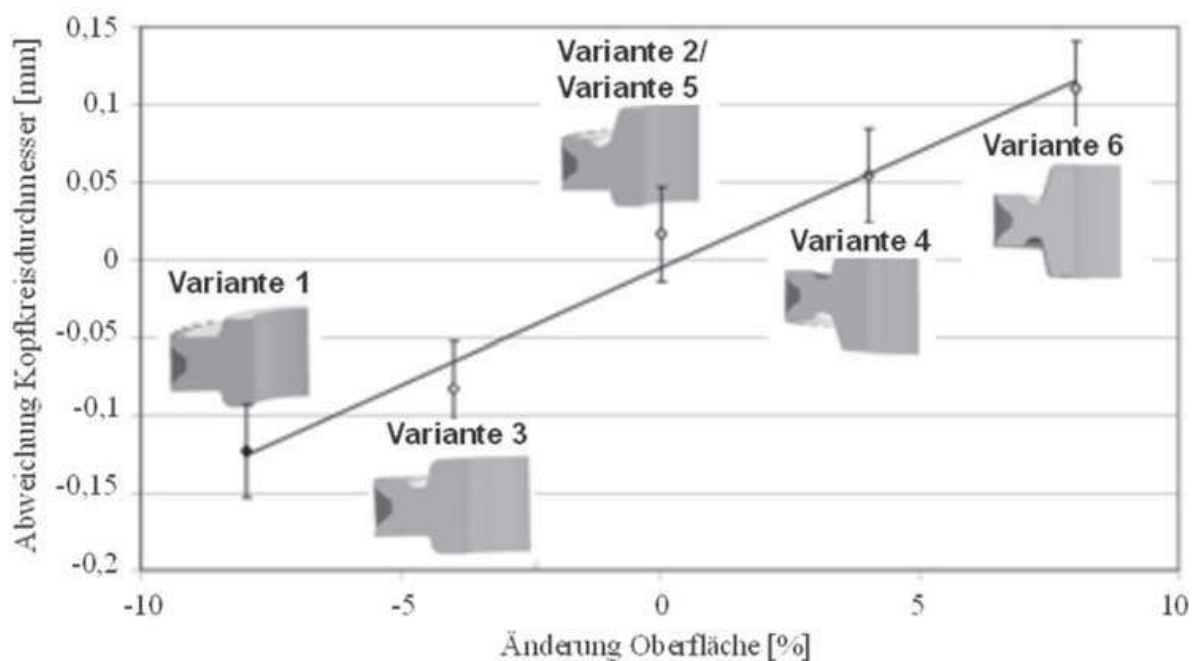


Abb. 2.6 Abhängigkeit des Kopfkreisdurchmessers von Grundkörpergestalt

„Kopfkreisdurchmesser“ von der Gestalt des Zahnradgrundkörpers, hier beschrieben über die resultierende Bauteiloberfläche, dargestellt [SFB02]. Untersuchungen von BOHN-SACK zeigten insgesamt eine Zunahme der Sensibilität der prozess- und bauteilbezogenen Zielgrößen mit zunehmender Bauteilkomplexität [Boh99].

2.3.2 Werkzeugkonzepte

Der entscheidende Unterschied zwischen dem konventionellen Schmieden und dem gratlosen Präzisionsschmieden im geschlossen Gesenk besteht in der einzusetzenden Werkzeugtechnologie. Während beim konventionellen gratbehafteten Schmieden auftretende Prozessungenauigkeiten und -schwankungen (Rohteilvolumen, Schmiedetemperatur, Einlegefehler, Werkzeug- und Maschinenkinematik) durch einen unregelmäßigen Materialabfluss in den Grat ausgeglichen werden können, ist dieses zur Sicherstellung der geforderten Fertigungstoleranzen beim gratlosen Präzisionsschmieden zu vermeiden [Doe10]. Neben einer unerwünschten zusätzlichen Abgratoperation zur präzisen Trennung von Grat und Bauteil, führt ein variierender Stofffluss zu schwankenden thermischen und mechanischen Gesenkbelastungen. Je nach Prozess und Bauteilgeometrie führt dies zu Veränderungen in der Gesenkaufweitung und letztendlich zur Beeinträchtigung der Fertigungsgenauigkeit. Zur Gewährleistung konstanter Prozessbedingungen ist ein unkontrolliertes Abfließen des Materials im Bereich der Teilungsebene zwischen den Werkzeugkomponenten des Ober- und Unterwerkzeugs durch ein sicheres Verschließen der Kavität im Umformprozess zu zwingend zu vermeiden.