



**Massivumgeformte  
Komponenten**

***Forged  
Components***





**Massivumgeformte**

**Komponenten**

*Forged*

*Components*

---

Dieses Buch wurde von der  
Hirschvogel Automotive Group erarbeitet.

*This book was produced by the  
Hirschvogel Automotive Group.*

**Verantwortlich**  
**Editor**

Dr.-Ing. Hans-Willi Raedt

**Beitragende**  
**Contributors**

Michael Dahme  
Dr. Manfred Hirschvogel<sup>†</sup>  
Peter Kettner  
Dr. Dirk Landgrebe  
Walter Pischel  
Christoph Ruile  
Michael Schleich  
Jürgen Wondrak

**Übersetzung**  
**Translation**

Sarah Cory-Raedt, [www.sarahcory.de](http://www.sarahcory.de)

2. Auflage, geringfügige Änderungen,  
Aktualisierungen und Korrekturen,  
6. Januar 2014

*2nd edition, minor changes,  
updates and corrections,  
January 6, 2014*

Druck: EGGER Druck + Medien GmbH

*Printing: EGGER Druck + Medien GmbH*

Herausgegeben und bearbeitet von  
© Hirschvogel Holding GmbH

*Issued and edited by  
© Hirschvogel Holding GmbH*



---

## **Widmung**

### ***Dedication***

Dieses Buch ist Dr. Manfred Hirschvogel gewidmet, der im Juli 2010 plötzlich und unerwartet verstarb.

*This book is dedicated to Dr. Manfred Hirschvogel, who passed away suddenly and unexpectedly in July 2010.*

## **Vorwort**

### ***Preface***

Massivumgeformte Komponenten sind in vielen Anwendungsbereichen Schlüsselbauteile für die Übertragung von Kräften und Momenten. Aufgrund ihrer herausragenden Werkstoffeigenschaften erlauben sie höchste Leistungsdichten. Damit ermöglichen sie erst durchgreifenden Leichtbau. Andere umgeformte Komponenten sind der Schlüssel für bestimmte Funktionen im Zielsystem (z. B. Wälzlagerungen zur Reibminimierung im Motor).

*Forged parts are key components for transmitting forces and torques in many application areas. Due to their outstanding material properties they can achieve the highest possible power densities, enabling the design of truly lightweight solutions. Other forged components are crucial for certain functions in the target system (e. g. anti-friction bearings for minimizing friction in the engine).*

In diesem Buch sollen die Prozesse zum Herstellen massivumgeformter Komponenten dargestellt werden. Die Eigenschaften der verwendeten Werkstoffe und die Entwicklungs- und QM-Methoden runden die Darstellung ab. An geeigneter Stelle illustrieren zahlreiche Beispiele die Potenziale massivumgeformter Komponenten.

*This book will present the processes for producing forged components. Subsequently, the properties of the materials used as well as development and QM methods will be outlined. Several examples will serve to demonstrate the potential that forged components hold.*

---

Die konsequent zweisprachige Präsentation erleichtert dem Herausgeber die konsistente Überarbeitung und Aktualisierung, mag aber auch dem deutschsprachigen Leser eine gewisse sprachliche Weiterentwicklung erlauben. Schließlich wird durch die Darbietung sowohl in klassischer Buchform als auch in elektronischer Form auf der Internetseite der Hirschvogel Automotive Group ([www.hirschvogel.com](http://www.hirschvogel.com)) eine ganz neue Qualität der Zugänglichkeit zu Grundlagen der Massivumformung und Verfahren der Weiter- und Fertigbearbeitung geboten.

*The bilingual text throughout the book makes it easier for the publisher to rework and update the contents in a consistent way. It may also offer German readers a chance to brush up on and improve their foreign language skills. In addition, the text is available both as a book and in electronic form at the Internet site of the Hirschvogel Automotive Group ([www.hirschvogel.com](http://www.hirschvogel.com)), allowing greater ease of access to the fundamentals of forging, processing and finishing technologies.*

Während die gedruckte Buchform für das lineare Durchlesen und Aneignen des Stoffs sicherlich am besten geeignet ist, ermöglicht die elektronische Version das schnelle Auffinden interessanter Stellen sowie die interaktive Arbeit mit dem Text.

*The book is certainly the best starting point for reading the text from beginning to end and for becoming familiar with the material; the electronic version provides convenience when carrying out quick searches for areas of interest within the text and for interactive work.*

Wir wünschen dem Leser einen guten Einstieg in die Verfahren der Massivumformung und der Weiterbearbeitung!

*We hope to provide readers with a good introduction to forging and machining processes!*

# Inhaltsverzeichnis

## Table of Contents

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	
	<b><i>Introduction</i></b>	<b>1</b>
1.1	Massivumformung	
	<i>Forging</i> . . . . .	1
1.2	Europäische und weltweite Massivumformung	
	<i>Forging Production in Europe and Worldwide</i> . . . . .	3
<b>2</b>	<b>Grundlagen der Umformtechnik</b>	
	<b><i>Fundamentals of Metal Forming</i></b>	<b>6</b>
2.1	Metallphysikalische Grundlagen	
	<i>Physical Metallurgy Basics</i> . . . . .	6
2.2	Plastizitätstheoretische Grundlagen	
	<i>Basics of Plasticity Theory</i> . . . . .	18
<b>3</b>	<b>Verfahren der Massivumformung</b>	
	<b><i>Forging Processes</i></b>	<b>23</b>
3.1	Ordnung der umformtechnischen Verfahren	
	<i>Categories of Forging Processes</i> . . . . .	23
3.2	Freiformschmieden	
	<i>Open-Die Forging</i> . . . . .	24
3.3	Umformung mit Formwerkzeugen	
	<i>Forging Processes with Contoured Punches and Dies</i> . . . . .	27
3.4	Sonderverfahren	
	<i>Special Processes</i> . . . . .	34
3.5	Kriterien der richtigen Verfahrensauswahl	
	<i>Criteria for Selecting the Optimum Process</i> . . . . .	35
<b>4</b>	<b>Warmumformung</b>	
	<b><i>Hot Forging</i></b>	<b>37</b>
4.1	Grundlagen	
	<i>Fundamentals</i> . . . . .	37
4.2	Maschinen und Umfeld	
	<i>Machines and Peripheral Equipment</i> . . . . .	40

4.3	Formgebung und Toleranzen <i>Shaping and Tolerances</i> . . . . .	45
4.4	Teilespektrum <i>Spectrum of Parts</i> . . . . .	48
<b>5</b>	<b>Warmumformung von Aluminium</b> <b><i>Hot Forging of Aluminum</i></b>	<b>52</b>
5.1	Grundlagen <i>Fundamentals</i> . . . . .	52
5.2	Maschinen und Umfeld <i>Machines and Peripheral Equipment</i> . . . . .	52
5.3	Formgebung und Toleranzen <i>Shaping and Tolerances</i> . . . . .	54
5.4	Teilespektrum <i>Spectrum of Parts</i> . . . . .	55
<b>6</b>	<b>Halbwarmumformung</b> <b><i>Warm Forging</i></b>	<b>58</b>
6.1	Grundlagen <i>Fundamentals</i> . . . . .	58
6.2	Maschinen und Umfeld <i>Machines and Peripheral Equipment</i> . . . . .	62
6.3	Formgebung und Toleranzen <i>Shaping and Tolerances</i> . . . . .	63
6.4	Teilespektrum <i>Spectrum of Parts</i> . . . . .	64
<b>7</b>	<b>Kaltumformung</b> <b><i>Cold Forging</i></b>	<b>67</b>
7.1	Grundlagen <i>Fundamentals</i> . . . . .	67
7.2	Maschinen und Umfeld <i>Machines and Peripheral Equipment</i> . . . . .	70
7.3	Formgebung und Toleranzen <i>Shaping and Tolerances</i> . . . . .	75
7.4	Teilespektrum <i>Spectrum of Parts</i> . . . . .	76

<b>8</b>	<b>Verfahren der Weiter- und Fertigbearbeitung</b>	
	<b><i>Machining and Finishing</i></b>	<b>82</b>
8.1	Einteilung der zerspanenden Verfahren <i>Classification of Cutting Processes</i> . . . . .	82
8.2	Fräsen <i>Milling</i> . . . . .	83
8.3	Drehen <i>Turning</i> . . . . .	85
8.4	Bohren <i>Drilling</i> . . . . .	85
8.5	Schleifen <i>Grinding</i> . . . . .	86
8.6	Herstellen von Verzahnungen <i>Manufacturing of Gears and Splines</i> . . . . .	89
8.7	Reibschweißen <i>Friction Welding</i> . . . . .	93
8.8	Elektrochemisches Abtragen (ECM) <i>Electrochemical Machining (ECM)</i> . . . . .	94
8.9	Montage- und Prüfvorgänge <i>Assembly and Testing Processes</i> . . . . .	96
<b>9</b>	<b>Verfahrenskombinationen</b>	
	<b><i>Process Combinations</i></b>	<b>98</b>
9.1	Kombinationen von Umformverfahren <i>Combining Metal Forging Processes</i> . . . . .	98
9.2	Kombination Umformung Zerspanung <i>Combining Forging and Machining</i> . . . . .	103
<b>10</b>	<b>Werkstoffe und Wärmebehandlung</b>	
	<b><i>Materials and Heat Treatment</i></b>	<b>108</b>
10.1	Umformbare Werkstoffe <i>Metals Suitable for Forging Operations</i> . . . . .	108
10.2	Wärmebehandlung von Umformteilen aus Stahl <i>Heat Treatment of Forged Steel Parts</i> . . . . .	113
10.3	Wärmebehandlung von Aluminium <i>Heat Treatment of Aluminum</i> . . . . .	123

<b>11 Qualitätsmanagement</b>	
<b><i>Quality Management</i></b>	<b>125</b>
11.1 Managementsystem	
<i>Management System</i> . . . . .	125
11.2 Gewährleistung der Produktqualität	
<i>Product Quality Assurance</i> . . . . .	126
<b>12 Moderne Entwicklungsmethoden</b>	
<b><i>Modern Development Methods</i></b>	<b>128</b>
12.1 Simultaneous Engineering	
<i>Simultaneous Engineering</i> . . . . .	129
12.2 Einsatz von FEM-Systemen	
<i>Use of FEM Systems</i> . . . . .	132
12.3 Rapid Prototyping	
<i>Rapid Prototyping</i> . . . . .	137
12.4 Rasterelektronenmikroskop (REM)	
<i>Scanning Electron Microscope (SEM)</i> . . . . .	138
<b>13 Schlussfolgerungen und Ausblick</b>	
<b><i>Conclusions and Outlook</i></b>	<b>142</b>
<b>14 Weiterführende Literatur</b>	
<b><i>Further Reading</i></b>	<b>145</b>
<b>Indices</b>	<b>147</b>
Index (Deutsch) . . . . .	147
<i>Index (English)</i> . . . . .	149

# 1 Einleitung

## *Introduction*

### 1.1 Massivumformung

#### *Forging*

Unter Massivumformung versteht man die Umformung eines Abschnitts aus gewalztem Stabstahl (runder Querschnitt), Knüppel (rechteckiger Querschnitt) oder Profil (stranggepresstes oder stranggegossenes Aluminium), beim Freiformschmieden auch direkt aus dem gegossenen Block. Damit unterscheidet sich die Massivumformung von der Blechumformung, deren Ausgangswerkstoff in flach gewalztem Zustand vorliegt.

Zur Massivumformung zählen eine Vielzahl von Verfahren, die warm, halbwarm oder kalt durchgeführt werden. Durch Massivumformung lassen sich nahezu alle metallischen Werkstoffe verarbeiten, und in Kombination mit den Wärmebehandlungsverfahren kann der Werkstoff sehr gut an den späteren Verwendungszweck angepasst werden.

Allerdings müssen Werkstoff, Bauteilgestalt und Umformtemperaturen gut aufeinander abgestimmt werden, um sowohl die optimalen Bauteileigenschaften zu erzielen als auch eine wirtschaftliche Fertigung zu gewährleisten.

Die Festigkeit von Bauteilen, insbesondere bei hohen Dauerwechselbeanspruchungen und bei hohen Kontaktspannungen, setzt einen geeigneten Faserverlauf voraus. Der Walzstahl besitzt bereits einen Faserverlauf in Längsrichtung, der beim Umformen in die spätere Bauteilgestalt ausgerichtet wird.

*Metal forging is a method of forming billets with a cylindrical cross section (rolled bar steel), with a rectangular cross section or from profile (extruded or continuously cast aluminum). In the case of open-die forging, the metal is shaped directly from the cast ingot. Forging therefore differs from sheet-metal forming, which uses flat-rolled material as input stock.*

*The term »forging« encompasses a variety of processes that are carried out hot, warm or cold. Forging is a suitable process for almost all metallic materials. In combination with the numerous heat-treatment processes, the material may be adapted to optimally meet the demands of the particular application area.*

*To achieve this, the material, component design and forging temperatures need to be coordinated well. Only then can ideal component properties and cost-efficient production be guaranteed.*

*The strength of engineering components, particularly in applications with high fatigue and high contact stresses, is dependent on suitable fiber flow. Rolled steel already has a longitudinal fiber flow pattern that is directionally aligned during forging to produce the desired component.*

Bei Teilen, die aus der Stange zerspant werden, wird hingegen die Faser angeschnitten. Im ungünstigsten Fall treten die Fasern senkrecht aus der Oberfläche aus. Dies kann zu geringer Belastbarkeit bei Dauerwechsel- oder Pittingbeanspruchungen führen. Des Weiteren führt ein hohes Spanvolumen zu einer schlechten Ausnutzung des eingesetzten Materials.

Insgesamt ist die Dauerwechselfestigkeit von massivumgeformten Werkstücken im Vergleich zu zerspanten, aber auch besonders zu gegossenen und gesinterten Werkstücken deutlich höher. Massivumgeformte Werkstücke werden daher bevorzugt dort eingesetzt, wo eine hohe Bauteilbeanspruchung und ein eingeschränkter Bauraum eine hohe Festigkeit des Werkstoffs erfordern. Darüber hinaus sind Schmiedeteile uneingeschränkt recyclingfähig.

*By contrast, this fiber orientation is cut in the case of parts machined from bars. In the worst case, the fibers then protrude perpendicularly from the surface, which may render the material more liable to fatigue and pitting. Furthermore, machined parts are produced with poor material utilization due to the high chip volume involved.*

*Forged workpieces have a much higher overall fatigue strength compared to machined and especially compared to cast or sintered parts. Forgings are therefore the components of choice in applications with high loads and limited space that demand high material strength. Furthermore, forged parts are completely recyclable.*



Abb./Fig. 1.1: Durch Massivumformung hergestellte Teile (Quelle: Industrieverband Massivumformung)  
*Examples of parts produced by forging (Source: Industrieverband Massivumformung)*



Die Formenvielfalt reicht von einfachen rotations-symmetrischen Wellen oder Zahnradrohlingen bis hin zu komplexen Geometrien wie Achsschenkeln, Schwenklagern und Kurbelwellen. Abb. 1.1 zeigt die Vielfalt der durch Massivumformung herstellbaren Werkstücke.

Bei den Werkstoffen liegt die größte wirtschaftliche Bedeutung auf der Umformung von Stahl. Die Nichteisenmetalle (NE-Metalle) machen nur einen Anteil von ca. 4% (Gewicht) der umgeformten Stahlbauteile aus. Die NE-Metalle und ihre umformtechnische Behandlung werden im Rahmen dieses Buchs nicht erwähnt. Eine Ausnahme bildet das Aluminium als wichtiger Leichtbauwerkstoff, welches im Kapitel 5 beschrieben wird.

Auch wird es sich in dieser Ausarbeitung ausschließlich um Verfahren zur Fertigung von einzelnen Bauteilen handeln; das bedeutet, dass die Verfahren der Halbzeugherstellung, wie z. B. das Längswalzen oder das Strangpressen, nicht behandelt werden.

## **1.2 Europäische und weltweite Massivumformung** ***Forging Production in Europe and Worldwide***

### **1.2.1 Internationale Massivumformung nach Erzeugnisbereichen** ***International Forging Production by Category***

Die weltweite Gesamtproduktion von massivumgeformten Erzeugnissen wird in Abb. 1.2 dargestellt. Den größten Anteil daran haben Gesenkschmiedeteile.

In den Daten der Warmumformung sind auch die der Halbwarmumformung beinhaltet. Des Weiteren werden Kombinationen der verschiedenen Verfahren angewandt, die nicht mehr exakt aufgegliedert werden können.

*The variety of parts which can be produced ranges from simple rotationally symmetric shafts and gear blanks to complex geometric shapes such as stub axles, steering knuckles, and crankshafts. Figure 1.1 shows some of the vast variety of components which can be manufactured by metal forging processes.*

*Out of all the materials, the forging of steel has the greatest economic significance. The non-ferrous metals account for only about 4% of the weight of all forged components. The non-ferrous metals and the forging thereof will not be mentioned within the framework of this book. One exception to this will be aluminum, an important material in lightweight design. This is the focus of Chapter 5.*

*Furthermore, this book will focus on forging processes for discrete components, and will not cover operations for producing semi-finished parts, such as longitudinal rolling or hot extrusion.*

*The total production of forgings worldwide is presented in Fig. 1.2, with parts produced by closed-die forging making up the largest share.*

*The hot forging data also includes warm forging. Furthermore, combinations of various processes are used, rendering precise categorization difficult.*

Ergebnisbereiche	Menge/t Tonnage/Metric Tons	Product Areas
Gesamtproduktion	27 496 000	Total production
Produktion von Gesenkschmiedeerzeugnissen	19 797 000	Production of closed-die forgings
Gesenkschmiedeteile (freie Schmieden)	6 799 000	Closed-die forgings (third party forging)
Gesenkschmiedeteile (werkseigene Schmieden)	809 000	Closed-die forgings (in-house forging)
Gesenkschmiedeteile (eigene Baugruppenlieferanten)	261 000	Closed die forgings (in-house subassembly suppliers)
Gebrauchsgüter (Installationszubehör, Werkzeuge, Maschinenteile)	658 000	Consumer goods (plumbing fixtures, tools, machine parts)
Gesamt: Kaltfließpressteile	644 000	Total cold forging parts
Kaltfließpressteile (freie Hersteller)	418 000	Cold forging parts (third party)
Kaltfließpressteile (werkseigene Hersteller)	95 000	Cold forging parts (in-house manufacturing)
Gesamt: Freiformschmiedestücke	6 886 000	Total open-die forgings
Geschmiedete und gewalzte Ringe	1 701 000	Forged and rolled rings
Freiformschmiedestücke	4 480 000	Open-die forgings

Abb./Fig. 1.2: Gesamtproduktion von Massivumformerzeugnissen 2011 (Quelle: Euroforge)  
*Total production of forgings in 2011 (Source: Euroforge)*

## 1.2.2 Schmiedeerzeugnisse nach Herkunft *Production by Region*

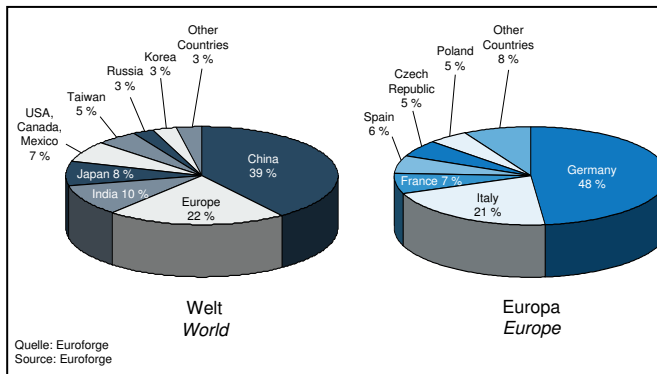


Abb./Fig. 1.3: Die weltweit wichtigsten Produzenteländer  
*The countries producing the largest volumes worldwide*

Die Diagramme in Abb. 1.3 zeigen, dass die deutsche Schmiedeindustrie europaweit führend ist.

Die Tatsache, dass die Schmiedeindustrie vor allem in Europa, USA und Japan stark ausgeprägt ist, lässt den Schluss zu, dass dieser Industriezweig stark mit der Fahrzeugindustrie zusammenhängen muss, da dieser Bereich in den erwähnten Regionen von großer Bedeutung ist.

Auch die Massivumformung ist der Globalisierung ausgesetzt. Hier sind allerdings zwei teilweise gegenläufige Tendenzen zu erkennen: Mit steigender Qualität in Billiglohnländern könnten Produzenten in Hochlohnländern einige Produkte verlieren (wobei hier einige Sourcing-Projekte auch schon wieder rückgängig gemacht worden sind). Andererseits wird ein steigender Lokalisierungsdruck weltweit tätiger Kunden für Massivumformteile beobachtet, um Währungs-, Logistik-, und Qualitätsrisiken zu vermindern. Dies kann für Massivumformer in Hochlohnländern durchaus neue Chancen beinhalten.

*The diagrams in Fig. 1.3 show that the German forging industry is the European leader.*

*It is no coincidence that the forging industry is dominant in those regions with a strong automotive industry, namely in Europe, the US and Japan.*

*Emerging markets such as Korea, Taiwan and China represent a rapidly growing group, with a combined 35% of total production. Closed-die forging is also subject to globalization. Here, however, two partially opposing trends may be observed. On the one hand, as quality increases in low-wage countries, producers in high-wage countries could lose some products (although some sourcing projects have already been retracted again). On the other hand, customers with operations worldwide are generating an increasing pressure to produce forged parts locally to avoid currency, logistics and quality risks. This may well open up new opportunities for forging companies in high-wage countries.*

## 2 Grundlagen der Umformtechnik

### *Fundamentals of Metal Forming*

#### 2.1 Metallphysikalische Grundlagen

##### *Physical Metallurgy Basics*

##### 2.1.1 Kristallaufbau

###### *Crystal Structure*

Die Werkstoffe für die Umformtechnik sind Metalle und deren Legierungen. Es ist daher unumgänglich, die Metallstruktur genauer zu betrachten, um zu einem Grundverständnis der Umformtechnik zu gelangen.

*To understand the fundamental physical behaviors which govern metal forming processes, one must first understand the structure of metals and their alloys.*

Metalle haben einen kristallinen Aufbau. Es gibt verschiedene Kristallstrukturen, die alle gewissen Symmetrieprinzipien unterworfen sind.

*Metals have a crystalline structure. There are various crystal structures that are all subject to certain symmetrical principals.*

Dies sind die Strukturen kubisch-raumzentriert, kubisch-flächenzentriert sowie hexagonal (siehe Abb. 2.1).

*These are body-centered cubic, face-centered cubic and hexagonal (see Fig. 2.1).*

Das kubisch-raumzentrierte Gitter (krz) besteht aus einer Anordnung von Atomen auf den Ecken eines Würfels. In der Mitte dieser acht Atome sitzt ein Weiteres.

*The body-centered cubic lattice (BCC) consists of atoms arranged on the corners of a cube. An additional atom is at the center of these eight other atoms.*

Die theoretische Raumbfüllung unter der Annahme kugelförmiger Atome dieser Kristallstruktur beträgt 68 %. Eine kubisch-raumzentrierte Kristallstruktur haben unter anderem  $\alpha$ -Eisen (Ferrit, also die meisten Stähle bei Raumtemperatur), Wolfram, Molybdän und  $\gamma$ -Messing.

*The spheres of this crystal structure occupy 68 % of the space. Metals with a body-centered cubic lattice include  $\alpha$ -iron (ferrite), i. e. most steels at room temperature, tungsten, molybdenum and  $\gamma$ -brass.*

Beim kubisch-flächenzentrierten Kristallgitter (kfz) sind acht Atome so angeordnet, dass sie die Ecken eines Würfels bilden.

*Eight atoms of the face-centered cubic lattice (FCC) are arranged in such a way that they form the corners of a cube.*

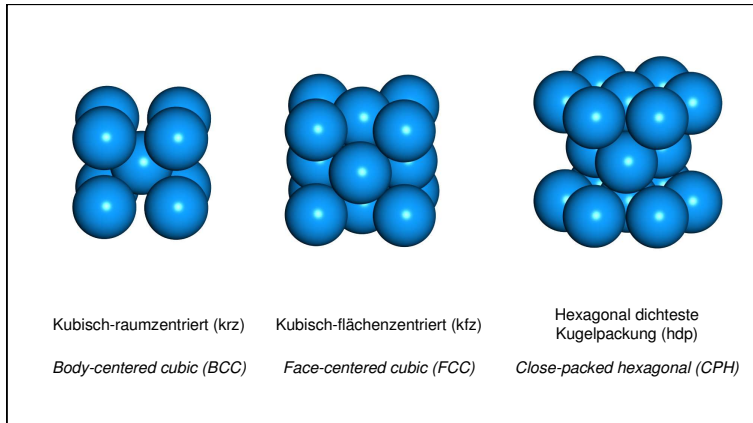


Abb./Fig. 2.1: Kristallgitter von Metallen  
*Crystal lattices of metals*

Zusätzlich sind insgesamt sechs weitere Atome mitig auf den Würfelflächen so angeordnet, dass bei Verbindung dieser ein Oktaeder entsteht. In diesem Gitter ist die Raumfüllung ca. 74 %, entsprechend einer dichtest möglichen Kugelpackung.

*In addition, a total of six other atoms are arranged at the center of the cube surfaces, so that an octahedron is formed when connecting them. In this lattice, the spheres form a close-packed structure, occupying the space in a most dense way (approx. 74 %).*

Eine kubisch-flächenzentrierte Kristallstruktur haben unter anderem Kupfer, Aluminium, Nickel, Blei, Gold, Silber und  $\gamma$ -Eisen (Austenitische Stähle).

*Metals with a face-centered cubic lattice include copper, aluminum, nickel, lead, gold, silver and  $\gamma$ -iron (austenitic steels).*

Das hexagonale Gitter besitzt ein regelmäßiges Sechseck als Grundfläche. Zwischen Grund- und Deckfläche haben zusätzlich drei weitere Gitterpunkte Platz.

*A regular hexagon forms the basic surface of the hexagonal lattice. Three additional lattice points are accommodated between the basic and the upper surface.*

Mit gleich großen Kugeln an den Gitterpunkten entspricht dies ebenso einer dichtesten Kugelpackung (hdp) wie beim kfz-Gitter, aber die Schichtungsreihenfolge der Gitterebenen ist unterschiedlich.

*With spheres of the same size at all the lattice points, this also represents a close-packed structure similar to the face-centered cubic lattice, although the sequence of layers at the lattice levels is different.*

Eine hexagonale Kristallstruktur haben unter anderem Cadmium, Zink, Magnesium, Titan und Beryllium.

*Metals with a hexagonal crystal structure include cadmium, zinc, magnesium, titanium and beryllium.*

Die besonderen Eigenschaften der Metalle liegen in der metallischen Bindung begründet: Metallatome geben jeweils ihre Leitungselektronen beim Einbau in das Gitter ab, womit sie sich fast wie positiv geladene Teilchen (Ionen) im Gitter befinden. Die losgelösten, negativ geladenen Elektronen bilden eine Art Wolke, die den Metallionenverband umgibt und ihn zusammenhält.

*The special properties of metal lie in the metallic bond. In the metallic structure, each metallic atom releases its valence electrons, thereby acting almost like positively charged particles (ions) in the lattice. The released, negatively charged electrons form a kind of cloud that surrounds the metal ion structure and holds it in place.*

Die Kristallstruktur hat einen großen Einfluss auf die Fließspannung und Duktilität des Metalls.

*The crystal structure has a great influence on the yield stress and ductility of the metal.*

Erwärmt man Reineisen, so stellt man bei  $910^\circ$  einen Haltepunkt fest. Untersuchungen zeigen, dass bei dieser Temperatur eine Phasenumwandlung stattfindet.

*If pure iron is heated, a temperature stagnation point is reached at  $910^\circ$ . Studies show that a phase change occurs at this temperature.*

Aus dem  $\alpha$ -Eisen (dem »Ferrit«) entsteht das  $\gamma$ -Eisen (der »Austenit«). Dieser Vorgang zeichnet sich dadurch aus, dass bei Wärmezufuhr die Temperatur steigt und sich das Gitter unter Kristallneubildung in eine neue, thermodynamisch stabile Struktur verändert. Kristallografisch betrachtet findet eine Umwandlung von »kubisch-raumzentriert« in »kubisch-flächenzentriert« statt.

*$\alpha$ -iron (»ferrite«) becomes  $\gamma$ -iron (»austenite«). The rise in temperature due to the supply of heat leads to the lattice recrystallizing and changing into a new, thermodynamically stable structure. From a crystallographic perspective, a switch from »body-centered cubic« to »face-centered cubic« takes place.*

Im Austenit besitzt Kohlenstoff eine deutlich höhere Löslichkeit, sodass sich oberhalb der Umwandlungstemperatur die Karbide auflösen. Dies hat einen großen Einfluss auf das Umformverhalten.

*The carbon in austenite has a considerably greater solubility, causing the carbides to dissolve above the phase change temperature. This has a significant effect on the deformation behavior.*

Die unterschiedlichen Gitterstrukturen des Eisens (und seiner Legierungen, den verschiedenen Stählen) und die unterschiedlichen Löslichkeiten des Kohlenstoffs in den jeweiligen Gitterstrukturen sind des Weiteren die Grundlage für die verschiedenen Wärmebehandlungsverfahren (siehe Kapitel 10).

*The different lattice structures of iron (and its alloys, the various steels) as well as the varying levels of solubility of the carbon in each of the lattice structures both form the basis for heat treatment processes (see Chapter 10).*

### **2.1.2 Gitterfehler, Versetzungen und Versetzungsbewegungen** ***Lattice Vacancies, Dislocations and Dislocation Movements***

Berechnet man die Bindungskräfte in Metallen mit atomphysikalischen Methoden, so findet sich eine Diskrepanz zwischen theoretischer Festigkeit und der durch Zugversuche ermittelten Festigkeit eines Werkstoffs von zwei bis drei Zehnerpotenzen.

*When atomphysical methods are used to calculate the bonding strengths in metals, a discrepancy of two to three decimal powers is determined between the theoretical strength and the strength of a material measured through tensile testing.*

Nur haarförmige Einkristalle großer Reinheit (sogenannte »Whiskers«) zeigen diese theoretisch berechneten extrem hohen Festigkeiten.

*Only hair-like single crystals of high purity (known as »whiskers«), however, exhibit these exceptionally high strengths, approaching theoretical strengths.*

Offensichtlich gibt es im technischen Kristallaufbau nicht die idealen Voraussetzungen, die für diese hohe Festigkeit notwendig sind.

*It seems that crystal structures of industrial alloys do not provide the ideal lattice structure necessary to achieve this high strength value.*

Im tatsächlichen Aufbau von Metallen befinden sich verschiedenartige Erscheinungen. Zunächst handelt es sich um einen vielkristallinen Aufbau, wobei die einzelnen Kristalle aneinanderstoßen und nicht geordnete Übergänge, die sogenannten »Korngrenzen«, bilden.

*A diverse combination of phenomena exists in the actual structure of metals. Firstly, there is a multi-crystalline structure in which individual crystals impinge on each other, forming loose, non-ordered transitions, known as »grain boundaries«.*

Im einzelnen Kristall (der in der Gefügelehre als »Korn« bezeichnet wird) selbst gibt es eine Reihe von Gitterfehlern: auf Gitterplätzen fehlende Atome, Einbau von Fremdatomen auf Gitterplätzen oder auf Zwischengitterplätzen und schließlich Versetzungen.

*Secondly, within a single crystal (known in metallography as a »grain«), there are a number of defects in the crystal, such as missing atoms at lattice sites, incorporation of impurities at lattice positions or interstitial sites, and lastly dislocations.*

Da die Versetzungen für den Fundamentalmehanismus der Umformung verantwortlich sind und dafür, dass die Festigkeit von technischen Metallen weit unter der der »Whisker« liegt, sollen sie im Folgenden näher betrachtet werden.

Versetzungen entstehen schon bei der Erstarrung von Metallen: Ausgehend von kleinen, anfänglichen »Baufehlern« wachsen die Kristalle beim Erstarren abweichend von der idealen Kristallstruktur. Eben so entstehen Versetzungen auch bei Rekristallisations- und Gefügewandlungsvorgängen.

Abb. 2.2 zeigt die beiden typischen Vertreter, die Stufen- und die Schrauberversetzung.

*As it is dislocations that govern many phenomena important to metal forging technology and as they are the cause of metal strengths being far below those observed in »whiskers«, it is necessary to study them in more detail.*

*Dislocations occur right from the moment when metals solidify. Starting as small, initial »structure defects«, the crystals develop during solidification in a way that deviates from the ideal crystal structure. Dislocations likewise occur during recrystallization and microstructural changes.*

*Fig. 2.2 shows the two typical examples of dislocations, namely the edge dislocation and the screw dislocation.*

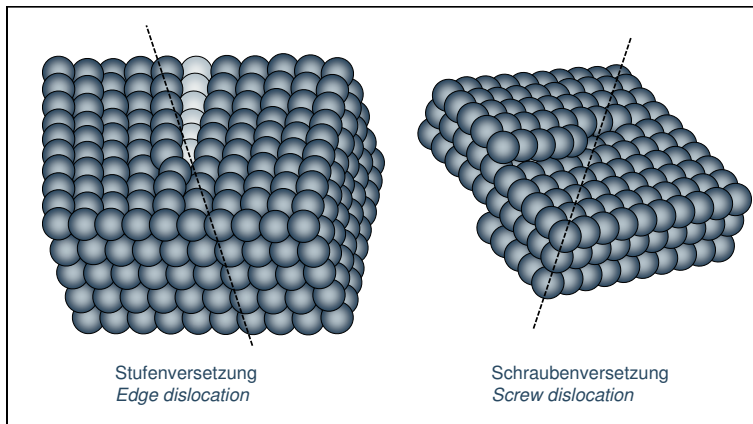


Abb./Fig. 2.2: Vereinfachte Darstellung von Versetzungen am Beispiel des einfachen kubischen Gitters  
*Simplified image of dislocations using the example of the simple cubic lattice*



Liegt an einem Kristall, der eine Stufenversetzung aufweist, eine genügend große Scherspannung an, so springt die eingeschobene Atomreihe sukzessive um, bis sie, wie Abb. 2.3 zeigt, bildlich »herausgewandert« ist.

*If a great enough shear stress is applied to a crystal with an edge dislocation, the row of atoms perpendicular to the dislocation will switch position successively until it has »migrated« outwards, as shown in Fig. 2.3.*

Die Versetzungsbewegung endet dabei meist an Korngrenzen.

*The movement of the dislocation generally ends at the grain boundaries.*

Die hierzu notwendige Spannung ist wesentlich niedriger als die Spannung, die aufzubringen wäre, um den Kristall insgesamt zu scheren und um diese eine Atomreihe zu verschieben.

*The stress needed for this to occur is considerably lower than the stress that would be necessary to shear the crystal completely and to displace this one row of atoms all at once.*

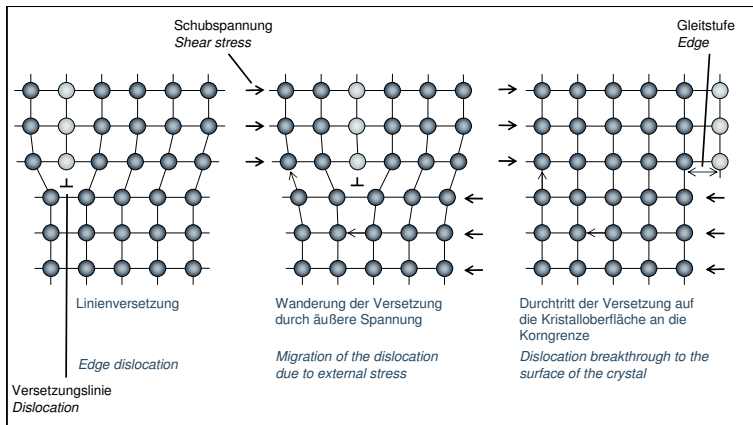


Abb./Fig. 2.3: Versetzungswanderung  
*Migration of dislocations*

Zu vergleichen ist dieser Effekt bildlich vereinfachend mit einem großen Teppich, der verschoben werden soll.

*Figuratively speaking, this effect may be compared to a large carpet that needs to be moved.*

Soll der ganze Teppich auf einmal bewegt werden, wird ein erheblicher Kraftaufwand benötigt.

*If the whole carpet is to be moved at once, a considerable amount of force is needed.*

Wird hingegen der Teppich an einem Ende etwas zusammen geschoben, sodass sich eine Falte bildet, lässt sich diese Falte mit geringer Kraft durch den ganzen Teppich durchschieben, mit dem Effekt, dass letztendlich der gesamte Teppich um die Länge der Falte verschoben wurde.

*If, however, the carpet is pushed together a little bit at one end, forming a fold, this fold can be pushed along the whole length of the carpet with considerably less effort, eventually causing the entire carpet to be moved by a distance the size of the fold.*

Scherspannungen ermöglichen ein Wandern von Stufen- und Schraubenversetzungen, bis diese jeweils durch ein Hindernis aufgehalten werden. Dies kann eine Ausscheidung sein, eine Korngrenze oder auch eine andere Versetzung.

*Shear stresses cause edge and screw dislocations to migrate until an obstacle prevents them from doing so. This obstacle may be a precipitation, a grain boundary or even another dislocation.*

Findet eine solche Versetzungsblockade statt, lässt sich dieser Kristall nur bei erhöhter Spannung weiter verformen. Dabei tritt der Effekt der Kaltverfestigung ein.

*If such a dislocation blockade occurs, the crystal cannot be deformed any further unless increased force is applied. This effect is known as strain hardening.*

Wenn Versetzungen aufeinandertreffen und sich blockieren, bilden sich bei weiterer Verformung (bei erhöhter Spannung) an den blockierten Versetzungen Versetzungsquellen. Dadurch steigt die Anzahl der Versetzungen im Kristall an. Bei der Kaltumformung bleiben diese Versetzungen erhalten, bei Halbwarm- und Warmumformung verringert sich die Anzahl der Versetzungen durch Erholung und Rekristallisation wieder.

*If dislocations impinge on and block each other, dislocation sources are formed at the site of the blocked dislocations upon further deformation (increased stress). This causes the number of dislocations in the crystal to increase. During cold forging, these dislocations are retained; during warm and hot forging, the number of dislocations is reduced again through recovery and recrystallization.*

### **2.1.3 Rekristallisation** ***Recrystallization***

Eine Wärmebehandlung, die prinzipiell bei jedem Metall anwendbar ist und die weder eine chemische noch eine Phasenveränderung hervorruft, ist die Rekristallisationsglühung.

*Recrystallization annealing is one type of heat treatment that, in principle, can be used with any type of metal and which causes neither chemical nor phase changes.*

Die Rekristallisationstemperatur, die wie die Schmelztemperatur bei jedem Metall verschieden ist, wurde früher als Grenze zwischen Warm- und Kaltumformung betrachtet.

*The recrystallization temperature, like the melting temperature, is unique to each metal and at one time was referenced as the boundary between hot and cold forging.*

Der Vorgang der Rekristallisation ist als Vorgang mit Platzwechseln von Atomen zeitabhängig; Voraussetzung ist eine vorausgegangene Kaltverformung und damit eine erhöhte Versetzungsdichte.

*As a process involving atoms changing position, recrystallization is time-dependent. The prerequisite for it to occur is prior cold deformation and thus increased dislocation density.*

Erhöht man die Temperatur eines verformten Kristalls mit erhöhter Versetzungsdichte, so bilden sich zunächst Versetzungsstrukturen um. Je nach Konstellation können sich Versetzungen auch gegenseitig auslöschen (»Erholung«).

*By increasing the temperature of a deformed crystal with an elevated dislocation density, dislocation structures begin to change. Depending on the constellation, dislocations may annihilate each other (»recovery«).*

Bei noch höherer Temperatur beginnt die Rekristallisation, bei der im versetzungsreichen verformten Kristallgitter neue, versetzungsärmere Körner keimen und dann wachsen. Dabei stellt man eine Abhängigkeit der rekristallisierten Korngröße vom Grad der Umformung fest (siehe Abb. 2.4).

*At an even higher temperature, recrystallization begins. During this process, new grains that have fewer dislocations begin to form along the old boundaries of distorted grains. A dependency of the resulting recrystallized grain size on the degree of plastic strain can be observed (see Fig. 2.4).*

Zunächst muss eine gewisse Mindestverformung (je nach Werkstoff 5 % bis 20 %) gegeben sein, um überhaupt den Beginn der Rekristallisation zu ermöglichen.

*A certain minimum strain (5 % to 20 %, depending on the material) must be initially present in order to trigger the recrystallization process at all.*

Die sich einstellende Korngröße ist umso kleiner, je größer die Verformung ist, da diese mehr Versetzungen erzeugt hat und dadurch mehr Rekristallisationskeime gegeben sind.

*The greater the plastic strain, the smaller the recrystallized grain size. This is due to the fact that an increase in the number of dislocations results in more recrystallization nuclei.*

Das bedeutet, dass die Rekristallisation an vielen Stellen gleichzeitig einsetzt und die sich neu bildenden Kristalle schneller an die nächsten stoßen und daher nicht weiter wachsen können.

*Recrystallization then occurs at many sites at the same time. This causes the newly forming crystals to impinge more rapidly on neighboring ones, thereby preventing their further growth.*

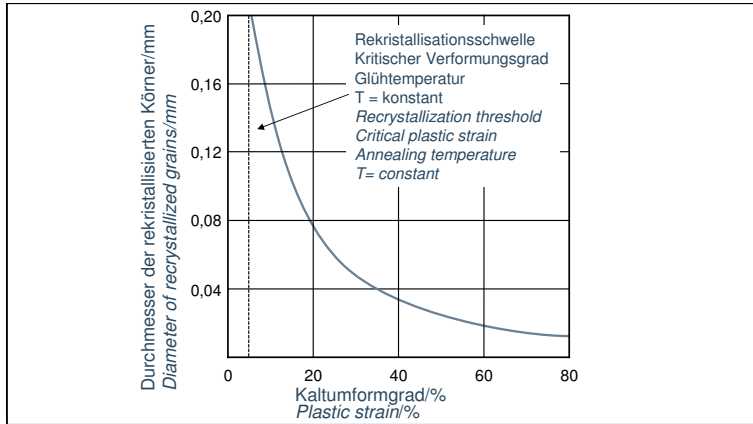


Abb./Fig. 2.4: Korngröße in Abhängigkeit von der Umformung  
*Dependence of grain size on plastic strain*

### 2.1.4 Stahl - die besondere Eisenlegierung **Steel - The Special Iron Alloy**

Unter Stahl versteht man die Legierung von Eisen (Fe) und Kohlenstoff (C) mit Kohlenstoffgehalten zwischen 0 und 2 Gewichtsprozent. Sie bietet einige Besonderheiten, die großtechnisch genutzt werden.

*Steel is an alloy of iron (Fe) and carbon (C), with carbon contents of between 0 and 2 weight percentage. Steel has certain special properties that can be put to large-scale industrial use.*

Die besonderen Eigenschaften von Stahl lassen sich im Eisen-Kohlenstoff-Diagramm ablesen (Abb. 2.5).

*The unique properties of steel may be seen in the iron-carbon diagram (Fig. 2.5).*

Darin werden die Phasen dargestellt, die sich in Abhängigkeit von Kohlenstoffgehalt und Temperatur in der Eisen-Kohlenstoff-Legierung bilden (Abb. 2.6).

*It shows the phases that form in the iron-carbon alloy depending on the carbon content and temperature (Fig. 2.6).*

Das Eisen-Kohlenstoff-Diagramm wird auf der rechten Seite schon bei 6,6 Gewichts-% Kohlenstoff abgeschlossen, da sich dort die stöchiometrische Verbindung  $\text{Fe}_3\text{C}$  bildet.

*The iron-carbon diagram ends on the right-hand side at only 6.6 weight percentage of carbon, as here the stoichiometric compound  $\text{Fe}_3\text{C}$  forms.*

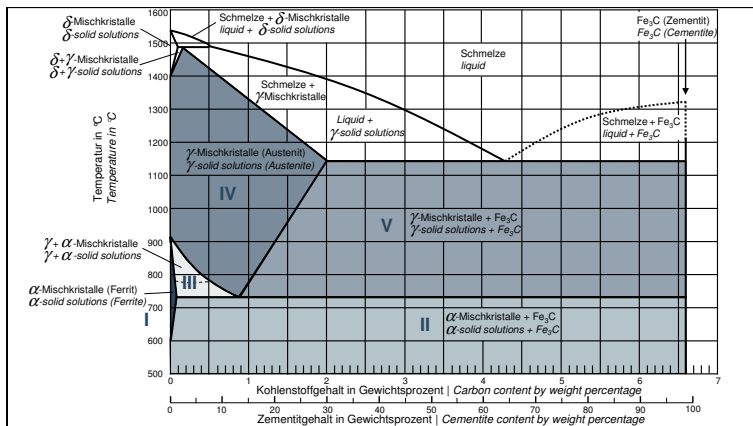


Abb./Fig. 2.5: Fe/Fe<sub>3</sub>C-Diagramm  
Fe/Fe<sub>3</sub>C diagram

Betrachtet man nun die für die Massivumformung relevanten Stahlsorten und die entsprechenden Temperaturen, so gilt zunächst bei der Erwärmung für z. B. einen Stahl mit ca. 0,45 % Kohlenstoff Folgendes:

Bei 723 ° beginnt die Bildung von  $\gamma$ -Eisen bzw. Austenit, während  $\alpha$ -Eisen mit zunehmender Temperatur immer weniger erhalten bleibt.

Erhöht man die Temperatur weiter, so trifft man bei ca. 775 ° auf die Grenze zum reinen Austenit.

Hier hat sich die gesamte Eisen-Kohlenstoff-Legierung in eine feste Lösung umgewandelt. In dem kubisch-flächenzentrierten Gitter sitzen die Kohlenstoffatome auf Zwischengitterplätzen.

*By focusing on steel grades used in forging and the corresponding temperatures, the following may be observed during the heating of steel with a carbon content of approx. 0.45 % (taken as an example):*

*At 723 °  $\gamma$ -iron or austenite begins to form, while the  $\alpha$ -iron content decreases with increasing temperature.*

*As the temperature continues to rise, the structure is fully transformed to pure austenite at 775 °.*

*Here, the entire iron-carbon alloy has changed into a solid solution. The carbon atoms are located at interstitial sites within the face-centered cubic lattice.*

<b>Feld I</b> <i>Field I</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reiner Ferrit (Fe) mit einem maximalen Gehalt von 0,02% C (der Kohlenstoff ist dabei als Zwischengitteratom gelöst) bei ca. 723 °C</li> <li>• <i>Pure Ferrite (Fe) with a maximum carbon content of 0,02% (the carbon is dissolved as an interstitial atom) at approx. 723 °C</i></li> </ul>
<b>Feld II</b> <i>Field II</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Stabiles Feld aus Ferrit (Fe) und Eisenkarbid (<math>\text{Fe}_3\text{C}</math>). Dies kann sich im Gefüge als Ferrit-lamellarer Perlit oder als globuläres <math>\text{Fe}_3\text{C}</math> (Eisenkarbid bzw. Zementit) in Fe-Matrix darstellen (GKZ-Gefüge).</li> <li>• <i>Stable field of ferrite (Fe) and iron carbide (<math>\text{Fe}_3\text{C}</math>). This can occur in the grain structure as ferrite-lamellar pearlite or as spheroidal <math>\text{Fe}_3\text{C}</math> (iron carbide or cementite) in an iron matrix (spheroidized grain structure).</i></li> </ul>
<b>Feld III</b> <i>Field III</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mischgebiet zwischen Austenit (<math>\gamma</math>-Eisen) und Ferrit (<math>\alpha</math>-Eisen)</li> <li>• <i>Mixed area between austenite (<math>\gamma</math>-iron) and ferrite (<math>\alpha</math>-iron)</i></li> </ul>
<b>Feld IV</b> <i>Field IV</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reiner Austenit (<math>\gamma</math>-Eisen, das die C-Atome auf Zwischengitterplätze gelöst hat)</li> <li>• <i>Pure austenite (<math>\gamma</math>-iron which has dissolved the carbon atoms at interstitial sites)</i></li> </ul>
<b>Feld V</b> <i>Field V</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Austenit (<math>\gamma</math>-Eisen) und ungelöstes Eisenkarbid (Zementit)</li> <li>• <i>Austenite (<math>\gamma</math>-iron) and undissolved iron carbide (cementite)</i></li> </ul>

Abb./Fig. 2.6: Felder im Eisen-Kohlenstoff-Diagramm  
*Fields in the iron-carbon diagram*

Die Phasenumwandlung durch Kornneubildung beruht auf Diffusionsvorgängen und ist deshalb von Zeit und Temperatur abhängig. Dies wird durch die ZTA-Schaubilder (»Zeit-Temperatur-Austenitisierungs-Schaubild«) beschrieben.

*The phase change due to the new grain formation occurs by diffusion and is dependent on time and temperature. This is shown in what are known as »time-temperature-austenitization diagrams«.*

Bei der Abkühlung können sich je nach Abkühlungsgeschwindigkeit aus dem Austenit unterschiedliche Gefüge einstellen. Diese Vorgänge werden später ausführlich beschrieben.

*During cooling, different grain structures can be achieved from the austenite depending on the cooling rate. These processes will be discussed in more detail at a later point in the book.*

### 2.1.5 Legierte Stähle *Alloy Steels*

Werden den Kohlenstoffstählen weitere Legierungselemente zugesetzt, so werden diese teilweise unter Mischkristallbildung im Eisen gelöst und teilweise zur Karbidbildung verbraucht.

*If other alloying elements are added to carbon steels, they become partially dissolved in iron as a solid solution and are partially used up in forming carbides.*

Legierungselement <i>Alloying element</i>	Tendenz zur Bildung von Mischkristallen oder Karbiden <i>Tendency towards formation of solid solution or carbides</i>						
	Feste Lösung <i>Solid solution</i>						Karbid <i>Carbide</i>
Phosphor <i>Phosphorus</i>							
Silicium <i>Silicon</i>							
Aluminium <i>Aluminum</i>							
Nickel <i>Nickel</i>							
Kobalt <i>Cobalt</i>							
Mangan <i>Manganese</i>							
Chrom <i>Chromium</i>							
Molybdän <i>Molybdenum</i>							
Wolfram <i>Tungsten</i>							
Vanadium <i>Vanadium</i>							
Niob <i>Niobium</i>							
Tantal <i>Tantalum</i>							

Abb./Fig. 2.7: Karbid- und Mischkristallbilder

*Elements that form carbides and solid solutions*

Die sich durch die Zulegierung verschiedener Elemente ergebenden Effekte sind sehr komplex, doch lassen sich hinsichtlich Karbid- und Mischkristallbildung bei den einzelnen Elementen Tendenzen aufzeigen, die wiederum Rückschlüsse auf die zu erwartenden Eigenschaften des Stahls zulassen (siehe Abb. 2.7).

So verbessern harte Karbide die Verschleißfestigkeit der Stähle bei gleichzeitig erschwelter Bearbeitbarkeit. Dies wird vor allem bei Werkzeugstählen ausgenutzt. Des Weiteren haben Karbide (sowie Carbonitride und Nitride) Einfluss auf die Halbwarm- und Warmumformung.

Löst sich dagegen ein Element im Ferrit, statt mit Kohlenstoff oder Stickstoff Verbindungen einzugehen, so können andere Eigenschaften sehr wirkungsvoll beeinflusst werden.

*Although the effects resulting from the addition of various alloys are very complex, certain trends are displayed within the individual elements with respect to carbide and solid solution formation. These, in turn, enable conclusions to be drawn about the expected properties of the steel (see Fig. 2.7).*

*Hard carbides, for example, improve the wear resistance of the steel, while at the same time making it more difficult to machine. This property is advantageous in tool steels. Furthermore, carbides (as well as carbon nitrides and nitrides) have an effect on warm and hot forging.*

*By contrast, if an element dissolves in ferrite instead of making compounds with carbon or nitrogen, other properties can be influenced in a very significant way.*

Sowohl Härte und Zugfestigkeit können wesentlich erhöht werden, vor allem aber die Härtbarkeit.

*Hardness, tensile strength and, above all, hardenability can all be increased considerably.*

Für die Wärmebehandlung von Stahl sind diese Legierungsbestandteile von essenzieller Bedeutung. So erhöhen einige Legierungselemente (Cr, Mo, ...) die Härtbarkeit. Durch die Erhöhung der Härtbarkeit wird die Durchhärtung bis in den Kern bei größeren Werkstückquerschnitten verbessert oder erst ermöglicht.

*These alloying components play a crucial role in the heat treatment of steel. Some alloying elements (Cr, Mo, ...), for example, increase hardenability. This leads to an improvement in or even enables the through hardening of large workpiece cross sections.*

Daneben kann es Einfluss auf Korrosionsbeständigkeit, auf elektrische Eigenschaften und auch auf die Verformbarkeit geben.

*Alloying elements can also influence aspects such as corrosion resistance, electrical properties and ductility.*

Wichtig ist, dass die Legierungslage des Stahls, Bauteilgestalt und das verwendete Umform- und Bearbeitungsverfahren frühzeitig während der Produktentwicklung aufeinander abgestimmt werden. Hier lassen sich oft wesentliche Kostensenkungen erzielen.

*It is important that the alloy level of the steel, the component design and the forging and machining processes used are all coordinated as early as possible during product development, as this can often lead to considerable cost savings.*

## 2.2 Plastizitätstheoretische Grundlagen

### *Basics of Plasticity Theory*

In Abb. 2.8 ist ein typisches Spannungs-Dehnungs-Diagramm, wie es sich aus dem Zugversuch ergibt, dargestellt.

*Fig. 2.8 shows a typical stress-strain curve resulting from tensile testing.*

Die Probe wird mit einer stetig wachsenden Zugkraft belastet. Die Streckgrenze (z. B.  $R_{p0,2}$ ) zeigt die Spannung, bei der die Zugprobe nach Entlastung nahezu (d. h. bis auf 0,2 %) wieder in ihre ursprüngliche Form geht, und wird oft als sicher bestimmbarer Größe für technische Anwendungen als Beginn der plastischen Verformung definiert.

*The test specimen is loaded with a continually increasing tensile force. The yield point (e. g.  $F_{ty}$  with 0.2 %) shows the stress at which the tensile test specimen will return almost to its initial shape (i. e. up to 0.2 %) after loading is removed. As a clearly identifiable parameter for technical applications, it is often defined as the start of plastic deformation.*



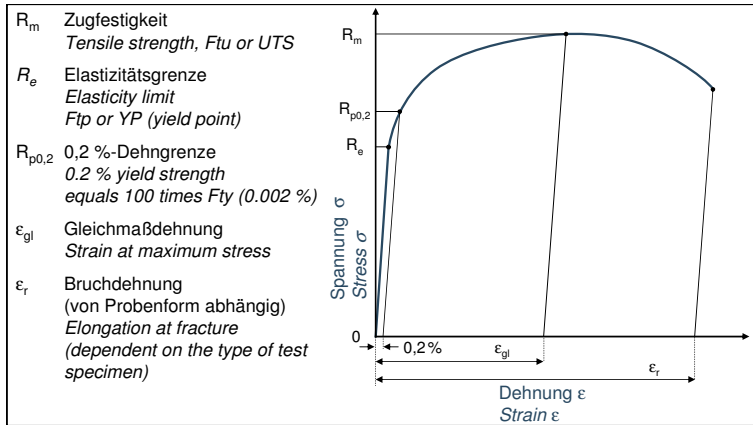


Abb./Fig. 2.8: Spannungs-Dehnungs-Diagramm  
*Stress-strain curve*

Nach Erreichen der Streckgrenze findet bei weiterer Steigerung der Zugspannung ein plastisches Fließen statt, das schließlich zu einem Bruch der Probe führt.

*After the yield point is reached, plastic deformation occurs upon further increasing the tensile stress, eventually leading to fracture of the test specimen.*

Die Beobachtung, dass die Mikrobruchflächen einer Zugprobe oft unter  $45^\circ$  verlaufen, veranlasste Tresca 1864, eine erste Fließbedingung zu formulieren, indem er die maximale Schubspannung  $\tau_{max}$  für das Eintreten plastischer Formänderung verantwortlich machte (Schubspannungshypothese):

*It was after having observed that micro fractures frequently occur at an angle of  $45^\circ$  that Tresca formulated an initial yield condition in 1864, stating that the maximum shear stress,  $\tau_{max}$ , was responsible for the occurrence of plastic strain (Maximum Shear Stress Criterion):*

$$\tau_{max} = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) = k \quad (2.1)$$

Dabei ist  $k$  die Schubfließgrenze (und somit ein Werkstoffkennwert) mit  $\sigma_1$  als größter und  $\sigma_3$  als kleinster Hauptspannung.

*$k$  represents the shear yield point (and thus a material-specific value) with  $\sigma_1$  as the maximum and  $\sigma_3$  as the minimum principal stress.*

Im Jahr 1913 erweitert von Mises diese Fließbedingung auf mehrdimensionale Spannungszustände, indem er (im Hauptachsensystem) für den plastifizierten Werkstoff definiert:

*In 1913 von Mises extended this yield criterion to include multi-dimensional states of stress by defining the following (in the principal axes system) for the plasticized material:*

$$k_f = \sqrt{\frac{3}{2} \left( (\sigma_1 - s_0)^2 + (\sigma_2 - s_0)^2 + (\sigma_3 - s_0)^2 \right)} \quad (2.2)$$

mit  $k_f$  als Formänderungsfestigkeit und  $s_0$  als dem hydrostatischen Spannungsanteil, der sich folgendermaßen aus den Hauptspannungen berechnet:

*$k_f$  represents the yield strength and  $s_0$  the hydrostatic stress which can be calculated as follows from the principal stresses:*

$$s_0 = \frac{1}{3} (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \quad (2.3)$$

Gleichung 2.2 lässt sich auch geometrisch im Hauptspannungsraum darstellen (Abb. 2.9): Dieses Kriterium entspricht einem Kreiszyylinder parallel zur Raumdiagonalen (dem hydrostatischen Spannungszustand).

*Equation 2.2 may also be represented geometrically in the principal stress space (Fig. 2.9). This criterion corresponds to a circular cylinder parallel to the space diagonals (the hydrostatic state of stress).*

Das bedeutet, dass eine reine hydrostatische Spannung (d. h.  $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ ), egal ob im Zug- oder Druckbereich, kein plastisches Fließen hervorrufen kann. Dies deckt sich auch mit der praktischen Erfahrung.

*This implies that pure hydrostatic stress (i. e.  $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ ) cannot cause plastic yielding, neither in the tensile or compressive area. This has been verified in practice.*

Alle Spannungszustände innerhalb dieses Zylinders entsprechen rein elastischen Zuständen. Erst, wenn ein Spannungsvektor die Fließfläche erreicht, setzt plastisches Fließen ein. Zerlegt man nun diesen Vektor in einen hydrostatischen Anteil und einen dazu senkrechten Anteil, so erkennt man, dass nur der Letztere, der sogenannte Deviatoranteil, für das plastische Fließen verantwortlich ist.

*All states of stress within this cylinder correspond to purely elastic states. It is only when a stress vector reaches the yield surface that plastic yielding occurs. By breaking this vector down into a hydrostatic part and a part perpendicular to it, it is possible to see that only the latter, known as the deviatoric stress, is responsible for plastic yielding.*

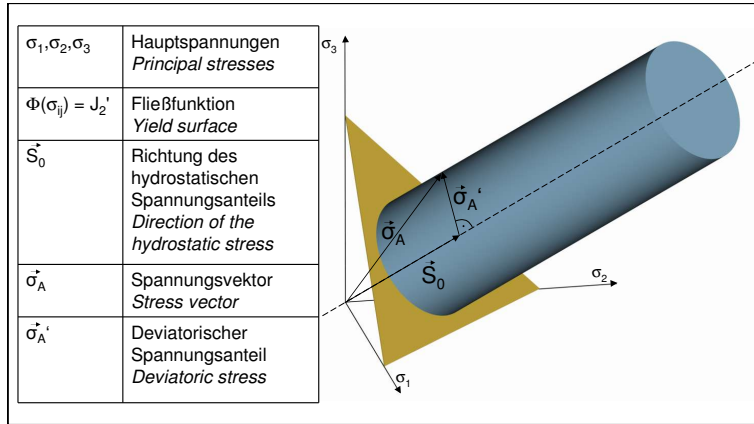


Abb./Fig. 2.9: Fließbedingung im Hauptspannungsraum  
*Yield condition in the principal stress space*

Da plastisches Fließen, wie die Erfahrung zeigt, immer in Richtung des Spannungsdeviators erfolgt, sind Spannungsdeviator und der Tensor der Deformationsgeschwindigkeiten koaxial. Aus dieser Aussage folgt als einfachster Zusammenhang zwischen Spannung und Deformation:

*Experience has shown that plastic yielding always occurs in the direction of the deviatoric stress tensor. Therefore, the stress deviator and the tensor of the deformation rates are coaxial. It is from this experience that the most basic connection between stress and deformation can be drawn:*

$$d\epsilon_{ij} = d\lambda(\sigma_{ij} - s_0) \quad (2.4)$$

Dabei ist  $d\epsilon_{ij}$  der inkrementelle Dehnungstensor,  $d\lambda$  ein Proportionalitätsfaktor,  $\sigma_{ij}$  ist der Spannungstensor und  $s_0$  die hydrostatische Spannung.

*$d\epsilon_{ij}$  represents the incremental strain tensor,  $d\lambda$  a proportionality factor,  $\sigma_{ij}$  the stress tensor and  $s_0$  the hydrostatic stress.*

Zusammen mit den Gleichgewichtsbedingungen und der Inkompressibilitätsbedingung stellen die Gleichungen 2.2 und 2.4 ein System dar, das für alle starr-plastischen Werkstoffe anwendbar ist.

*Together with the equilibrium and incompressibility conditions, equations 2.2 and 2.4 represent a system that can be applied to all rigid-plastic materials.*

Da dieses Gleichungssystem aber sehr komplex ist, darüber hinaus die Abhängigkeit der Werkstoffkennwerte vom Umformgrad, der Formänderungsgeschwindigkeit und der Temperatur nur näherungsweise zur Verfügung stehen und die Randbedingungen oft nur unzureichend bekannt sind, wurde sehr früh (Siebel in den 1920er-Jahren) schon begonnen, mit der sogenannten elementaren Plastizitätstheorie zu arbeiten.

Durch Anwendung geometrischer Idealkörper wurde versucht, gewisse Umformvorgänge zu beschreiben.

In der Zwischenzeit ist die Bedeutung dieser elementaren Plastizitätstheorie durch die Entwicklung von FEM-Simulationen (Finite-Elemente-Methode), die aufgrund hoher Rechnerleistungen möglich wurden, für den praktischen Umformer stark zurückgedrängt worden.

Mithilfe der FEM lassen sich heute die Spannungs- und Dehnungszustände während der Umformung im gesamten umgeformten Volumen berechnen.

Dadurch kann der Stofffluss, die Belastung der Werkzeuge und der Kraft- und Arbeitsbedarf, der für die Umformung eingesetzten Maschinen recht zuverlässig abgeschätzt werden.

Auf den Einsatz von FEM-Systemen wird im Kapitel 12 eingegangen.

Eine ausführliche Darstellung der Plastizitätstheorie würde die Zielsetzung dieses Buchs und die Fähigkeiten des überarbeitenden Autors bei Weitem übersteigen. Der interessierte Leser findet für schlaflose Nächte im hinteren Teil des Buchs auf Seite 145 eine Auflistung weiterführender Literatur.

*This set of equations is very complex, however. On top of this, the dependency of the material properties on different strains, strain rates and temperature is only roughly known, as are the boundary conditions. It is for all of these reasons that the elementary plasticity theory was employed instead from very early on (Siebel in the 1920s).*

*By using geometric ideal objects, attempts were made to describe certain metal forming processes.*

*Today, the significance of this elementary plasticity theory has been reduced considerably for forging practitioners by the development of FEM simulations (Finite Element Method), which have been made possible by greater computational efficiency.*

*FEM can be used to calculate states of stress and strain during forging for the entire forged volume.*

*This enables material flow, tool load as well as the force and work requirements for relevant forging machines to be estimated quite reliably.*

*The use of FEM systems will be described in more detail in Chapter 12.*

*A detailed description of plasticity theory would far exceed the scope of this book and the abilities of the editor. Those interested in filling sleepless nights may draw useful information from the literature listed in the Further Reading section towards the end of this book on page 145.*

# 3 Verfahren der Massivumformung

## *Forging Processes*

### 3.1 Ordnung der umformtechnischen Verfahren

#### *Categories of Forging Processes*

Unter der Umformtechnik versteht man eine Gruppe von Verfahren der Fertigungstechnik, welche die gegebene Form eines festen Körpers in eine andere Form unter Beibehaltung der Masse und des Stoffzusammenhangs überführen.

*Metal forging refers to a group of production processes which convert the given form of a solid body into another form while retaining its mass and material cohesion.*

Innerhalb der Umformtechnik werden je nach Beanspruchung des Werkstücks während des Fertigstellungsvorgangs fünf Verfahrensgruppen definiert: Druckumformung (DIN 8583), Zugdruckumformung (DIN 8584), Zugumformung (DIN 8585), Biegeumformung (DIN 8586) und Schubumformung (DIN 8587).

*The German Institute for Standardization (DIN) defines five process groups within metal forging technology, depending on the stress state of the workpiece during the production process: Forging under compressive conditions (DIN 8583), forging under combined tensile and compressive conditions (DIN 8584), forging under tensile conditions (DIN 8585), forging by bending (DIN 8586) and forging under shear conditions (DIN 8587).*

Innerhalb dieser Obergruppe erfolgt eine weitere Einteilung der Verfahren nach verschiedenen Gesichtspunkten, wie z.B. der Kinematik oder der Werkzeuggeometrie.

*Within each of these main groups, the processes are sub-divided again according to different criteria, such as kinematics or tool geometry.*

Ein weiteres Unterscheidungsmerkmal ist die Temperatur. Während früher die Rekristallisationstemperatur als Grenze zwischen Warm- und Kaltumformung gegolten hat, unterscheidet man heute zwischen Kalt-, Halbwarm- und Warmumformung.

*Temperature is another distinguishing characteristic. Whereas previously the recrystallization temperature was referenced as the boundary between hot and cold forging, processes are classified today as cold, warm or hot forging.*

Neben den oben erwähnten fünf Verfahrensgruppen unterteilt man in der Praxis aufgrund Werkzeug- und maschinentechnischen Gesichtspunkten die Verfahren in Blech- und Massivumformung.

*Besides the five process groups mentioned above, a distinction is made in industry between metal sheet forming and forging based on the tools and machinery employed.*

Im Folgenden sollen nun die Verfahren der Massivumformung, die zur Herstellung von einzelnen Werkstücken herangezogen werden, kurz betrachtet und definiert werden.

*In the following, forging processes used for producing discrete workpieces will be briefly outlined and defined.*

Die im Folgenden dargestellten Prozesse entziehen sich einer stringenten Einteilung, da sie sich in mehreren Prozesseigenschaften unterscheiden. Trotzdem können so eine Reihe an Grundbegriffen der Massivumformung eingeführt werden.

*The processes outlined in the following evade strict classification, as they differ in several process properties. Nevertheless, a range of basic forging concepts can be established.*

Walz- und Strangpressverfahren, die vorwiegend zur Halbzeugherstellung dienen, werden im weiteren Verlauf aber nicht behandelt.

*Rolling and hot extrusion processes, both of which are used primarily for the production of semi-finished goods, will not be dealt with here.*

### **3.2 Freiformschmieden** ***Open-Die Forging***

Unter Freiformschmieden versteht man eine Umformung, die mit einfachen Werkzeugen ein Werkstück durch geschickte Manipulation von Werkstück und Maschine in eine neue Form bringt. Aufgrund der einfachen Werkzeuge und des geringen Rüstaufwands sind die Fixkosten pro Auftrag niedrig.

*Open-die forging is a process in which the workpiece is shaped by skillful manipulation between simple tools. The simplicity of the tools and the ease of machine set-up result in low fixed costs per order.*

Demhingegen ist die Prozesszeit bedingt durch die inkrementelle Umformung im Vergleich zu Pressverfahren mit Formwerkzeugen recht lang. Deshalb eignet sich dieses Verfahren vorzugsweise zur Herstellung von Einzelstücken oder Kleinserien.

*The drawback is that the incremental nature of this forging process renders it very long in comparison to forging in dies. This process thus lends itself particularly well to producing discrete parts or small production runs.*

Die angewandten umformtechnischen Einzelverfahren sind Stauchen, Recken, Eindornen und Lochen. Die Bearbeitungsaufmaße der Werkstücke sind größenabhängig und liegen im Allgemeinen über 5 mm pro Seite bei Werkstückabmessungen im Bereich mehrerer 100 mm bis weit über 1.000 mm.

*Examples of open-die forging processes are upsetting, stretch forging, punching and hollow forging. The machining allowances of the workpieces depend on size and are generally about 5 mm per side for workpieces in the size range of several 100 mm to well over 1,000 mm.*

### 3.2.1 Rundkneten Swaging

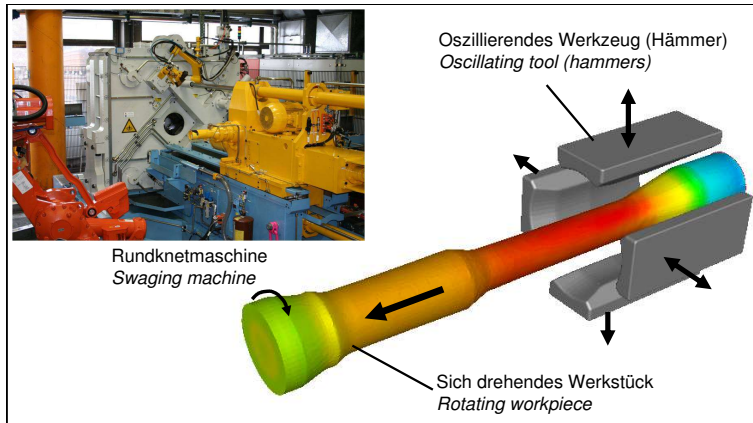


Abb./Fig. 3.1: Rundkneten als ein Beispiel für ein Freiformschmiedeverfahren  
*Swaging as an example of an open-die forging process*

Ein Verfahren, das streng genommen ebenfalls zum Freiformschmieden gehört, ist das Rundkneten (Abb. 3.1).

*Rotary swaging is a process which, strictly speaking, falls under the category of open-die forging (Fig. 3.1).*

Durch die automatische Manipulation der Werkstücke und durch die exakte Steuerung der Hämmer lassen sich vorzugsweise wellenförmige Werkstücke mit großer Wiederholgenauigkeit herstellen.

*Due to the automatic manipulation of the workpieces and the exact control of the forging tools, it is possible to produce shaft-like workpieces with a high degree of repeatability.*

Die typischen Werkstückgrößen beim Rundkneten sowie die automatisierte Fertigung (im Vergleich zum Freiformschmieden großer Werkstücke) erlaubt dabei auch die Herstellung größerer Serien.

*The typical workpiece size in swaging and the automated nature of this production process (in comparison to open-die forging of larger workpieces) also enable larger production runs.*

Das Verfahren steht damit im Wettbewerb zum Genskschmieden, kann aber verfahrensbedingt Geometrien herstellen, die sich mehrstufigen Pressverfahren nicht erschließen.

*Although in this respect, swaging is in competition with closed-die forging, the nature of the process enables the manufacture of shapes that cannot be produced by closed-die forging.*

Die Wirtschaftlichkeit im Vergleich zu anderen Verfahren hängt jeweils ab von den Entwicklungs- und Einrichtekosten, den benötigten Prozessketten, den Maschinenkosten und schließlich von den möglichen Losgrößen.

*The cost-efficiency of swaging compared to other processes depends in each case on the development and set-up costs, the necessary process chains, the machine costs and finally the batch sizes possible.*

Generell kann festgestellt werden, dass für höhere Stückzahlen mehrstufige Umformprozesse auf Pressen den inkrementellen Prozessen wirtschaftlich überlegen sind.

*Generally it can be stated that, for higher volumes, multi-stage forging processes on presses are economically advantageous compared to incremental forging processes.*

Beim Kaltrundkneten werden Präzisionsteile mit vorzugsweise fertiger Innenkontur geformt, indem die Hämmer ein Hohlteil über einen Dorn ausformen. Hier sind sogar nicht-rotationssymmetrische Innenkonturen denkbar wie Verzahnungen oder Polygonformen.

*Cold rotary swaging involves producing precision parts that often have finished internal profiles. The process uses hammers to form a hollow part over a mandrel. Even non-rotational inner contours such as splines and polygon geometries are possible.*

### **3.2.2 Warm- und Kaltstauchen** ***Hot and Cold Upsetting***

Das Stauchen ist eines der Verfahren des Freiformschmiedens. Es findet aber auch oft Anwendung in einer Stufe einer stärker werkzeuggebundenen Stadienfolge (Kapitel 3.3).

*Upsetting is one of the processes in open-die forging. It is, however, often also applied as one of the stages of a closed-die forging process (Chapter 3.3).*

Beim Stauchen (siehe Abb. 3.2) wird die Dicke des Werkstücks vermindert und der Werkstoff vorwiegend in Querrichtung verdrängt. Beim Stauchen in Formwerkzeugen steigt dabei der Werkstoff in die Kavitäten.

*During upsetting (see Fig. 3.2), the thickness of the workpiece is reduced and the material is forced primarily into a lateral direction. When upsetting in shaped tools, the material rises into the tool cavities.*



### 3.3 Massivumformung mit Formwerkzeugen *Forging Processes with Contoured Punches and Dies*

Während beim Freiformschmieden die einfachen Werkzeuge inkrementell das Werkstück formen, werden viel mehr Bauteile mit Formwerkzeugen hergestellt, z. B. beim Gesenkschmieden.

*Whereas open-die forging shapes the workpiece incrementally using simple tools, a greater number of parts are produced using contoured punches and dies, e. g. in closed-die forging.*

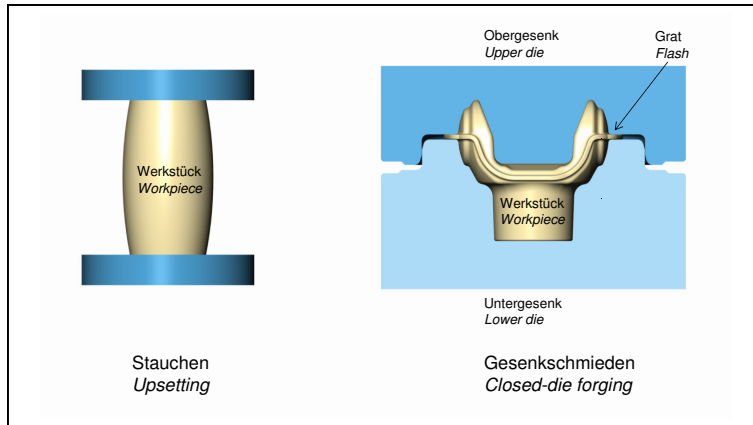


Abb./Fig. 3.2: Stauschen und Gesenkschmieden  
*Upsetting and closed-die forging*

#### 3.3.1 Gesenkschmieden *Closed-Die Forging*

Das Gesenkschmieden (siehe Abb. 3.2) ist das gängigste Verfahren der Massivumformung und vom Mengenaufkommen auch das absolut bedeutendste.

*Closed-die forging (see Fig. 3.2) is the most commonly used process in forging and is also the leader in terms of volume.*

Gesenkschmieden ermöglicht die Massenproduktion von komplizierten Werkstücken mit besten Werkstückeigenschaften.

*Closed-die forging allows the mass-production of complicated workpieces that display optimum mechanical properties.*

Bei Schmiedetemperatur (ca. 1.200° für Stahl) wird das Werkstück zwischen zwei formgebenden Werkzeughälften ausgepresst; der Materialüberschuss fließt dabei zwischen Ober- und Unterwerkzeug als Grat zwischen den Gratbahnen in den Gratraum und wird in einer abschließenden Operation abgegratet.

*At forging temperature (approx. 1,200° for steel), the workpiece is pressed between the two halves of a tool which have the shape of the finished part. Surplus material flows out from between the upper and lower dies, forcing flash outside of the die cavity. This is sheared away during a trimming operation.*

Die Bearbeitungsaufmaße von Schmiedestücken liegen im Allgemeinen zwischen 1 mm und 3 mm; durch Sondermaßnahmen und weitergehende Operationen können aber auch einbaufertige Flächen erzeugt werden (siehe Kapitel 3.3.6).

*The machining allowances of forgings generally lie between 1 mm and 3 mm. Special measures and subsequent operations make it possible to produce assembly-ready surfaces (see Chapter 3.3.6).*

Da bei diesem Verfahren formgebende Werkzeuge (Gesenke) für mehrere zu erarbeitende Schmiedestufen verwendet werden, deren Konstruktion und Herstellung relativ aufwändig und teuer ist, rechnen sich die Werkzeugentwicklungskosten erst ab einer gewissen Stückzahl.

*This process involves several forging stages. These have to be developed and the tools produced. Thus, a return on investment with respect to initial costs is only possible above a certain minimum production volume.*

Dies gilt vor allem für komplexe Teile, die meist eine aufwändige Materialverteilung benötigen, um ein qualitativ einwandfreies Schmiedestück zu ermöglichen.

*This is especially true of complex parts, which normally require considerable predistribution of the material to ensure production of a high-quality forging.*

### **3.3.2 Fließpressverfahren** ***Extrusion Processes***

Unter Fließpressen versteht man Verfahren, bei denen ein Werkstück durch eine Werkzeugöffnung durchgedrückt wird und dadurch die Formgebung erfährt. Man unterscheidet hier zwischen Vollvorwärts-, Hohlvorwärts- und Napfrückwärtsfließpressen (siehe Abb. 3.3).

*Extrusion refers to a variety of processes in which a workpiece is forced through a smaller diameter and thus forged. Extrusion can be sub-divided into forward rod extrusion, forward tube extrusion, or as backward cup extrusion (see Fig. 3.3).*

Beim Vollvorwärtsfließpressen wird ein Stabschnitt durch eine Düse gedrückt, wodurch ein abgesetzter Vollkörper entsteht.

*Forward rod extrusion involves forcing a billet section through a die to produce a solid body with two or more diameters.*

Beim Hohlvorwärtsfließpressen wird ein massiver oder hohler Zylinder über einen Dorn durch eine Düse gedrückt, wodurch ein abgesetzter Hohlkörper entsteht.

*During forward tube extrusion, a solid billet or hollow tube is forced over a mandrel through a die, thereby producing a hollow part with two or more diameters.*

Das Napfrückwärtsfließpressen ist dadurch gekennzeichnet, dass in einen Vollkörper, der sich in einer Matrize befindet, ein Stempel eingedrückt wird. Dieser bewirkt das Hochsteigen des Materials zwischen Stempel und Matrize.

*In backward cup extrusion, a punch is pushed into a solid part which is situated in a die cavity, causing the material to rise between the punch and the die cavity.*

Daneben gibt es weitere Varianten dieser Verfahren, die zusammen mit den unterschiedlichen Stauchverfahren eine Vielzahl rotationssymmetrischer Formgebungen ermöglichen.

*In addition to these three processes, there are numerous other variations which, together with different upsetting processes, can provide a multitude of rotationally symmetric shapes.*

Neben diesen Vorwärts- und Rückwärtsfließpressvorgängen werden viele weitere Verfahren, wie beispielsweise Reduzieren, Abstreckgleitziehen oder das häufig eingesetzte Querfließpressen, angewandt.

*Besides these forward and backward extrusion processes, many other operations, such as reducing, ironing or commonly used lateral extrusion operations are employed.*

Fließpressverfahren eignen sich zur Massenherstellung von vorwiegend rotationssymmetrischen Werkstücken, die pro Teil wenige Gramm bis etwa 30 kg wiegen können.

*Cold extrusion processes are particularly suitable for the mass production of rotationally symmetric parts, weighing from a few grams to around 30 kg per part.*

Wendet man diese Verfahren bei Warmformgebungstemperatur an, so spricht man vom Warmfließpressen. Analog gilt dies für die Halbwarmumformung.

*If this process is employed at hot forging temperature, it is referred to as hot extrusion. If it is carried out at elevated temperatures below hot forging temperature, it is known as warm extrusion.*

Bei Raumtemperatur angewandte Fließpress- und Stauchverfahren bilden die grundlegenden Formgebungsmöglichkeiten der Kaltumformtechnik. Allerdings müssen für Stahl in Bezug auf Warm- und Oberflächenbehandlung zunächst gewisse Voraussetzungen geschaffen werden, die später ausführlich beschrieben werden.

*Extrusion and upsetting processes employed at room temperature are the basis of the range of forging possibilities available in cold metal forging. With respect to the heat treatment and surface preparation of steel, however, certain prerequisites need to be observed. These will be dealt with in more detail later.*

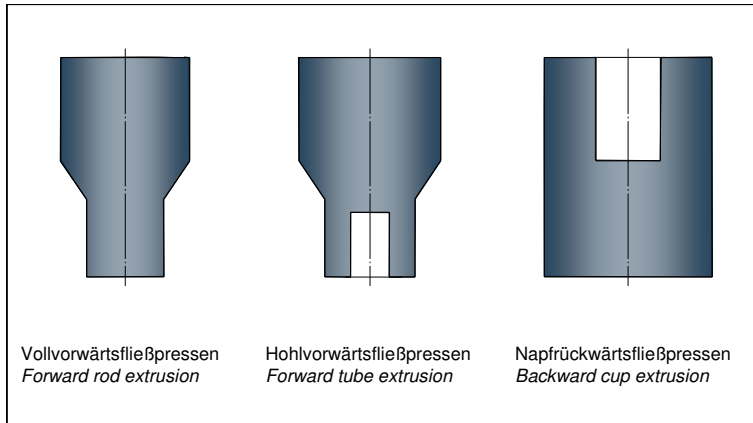


Abb./Fig. 3.3: Fließpressverfahren  
Extrusion processes

Stauchoperationen im Formwerkzeug sind oft Bestandteil eines mehrstufigen Stadiengangs in der Warm-, Halbwarm- oder Kaltumformung.

*Upsetting operations using dies are often part of a multi-stage process in hot, warm or cold forging.*

Vor allem im Zusammenhang mit der Schraubenherstellung spricht man oft vom Kaltstauchen.

*Cold upsetting, or heading, is most often associated with fastener production.*

Ausgehend vom Draht, der einen Durchmesser bis zu 35 mm besitzen kann, werden auf Kaltmehrstufenpressen durch mehrstufige Fließpress- und Stauchoperationen z. B. Schrauben hergestellt.

*Starting with wire that can be up to 35 mm in diameter, cold multi-stage presses can produce screws, for example, by means of various extrusion and upsetting operations.*

Das Verfahren Warmstauchen ist eng verbunden mit den Waagrechtstauchmaschinen.

*Hot upset forging is a process widely used on horizontal upset forging machines.*

Die früheren Pkw-Generationen mit Hinterradantrieb und Starrachsen verlangten Steckachsen, d. h. lange Wellen mit Flansch.

*Early generations of passenger car with rear-wheel drive and fixed axles required fixed wheel spindles, i. e. long shafts with a flange.*

Auf Waagrechtstauchmaschinen, die neben der Stauchbewegung des Schlittens noch eine zusätzliche Klemmbewegung von oberem und unterem Werkzeug ermöglichten, konnten durch dieses Öffnen und Schließen der Werkzeughälften derartige Flanschwellen mit langen Schäften hergestellt werden.

*Horizontal upset forging machines which, along with the upsetting motion of the ram, also provided a clamping movement of the upper and lower tool, were able to produce such long flanged shafts due to the opening and closing movement of the tool halves.*

Die Bedeutung dieser Stauchmaschinen ging mit dem zunehmenden Einsatz von Gleichlaufgelenkwellen im Automobilbau zurück. Es gibt aber immer noch Anwendungen, wobei vor allem die Möglichkeit des mehrstufigen Stauchens große Einstauchlängen und damit große Kopfvolumina ermöglicht.

*The importance of these upsetting machines declined with the increasing use of constant-velocity drive shafts in automotive construction. There are still applications, however, for which multi-stage upsetting can facilitate great upsetting lengths and thus large heads.*

### **3.3.3 Gratlosschmieden auf Warmmehrstufenpressen** ***Flashless Hot Forging on Multi-Stage Presses***

Ein besonderes Verfahren der Warmumformung ist das Gratlosschmieden in einer speziellen Ausprägung auf liegenden automatisierten Mehrstufenpressen.

*Flashless hot forging is often carried out on specialized horizontal automated multi-stage presses.*

Einfache Bauteile wie z. B. Zahnradrohlinge, Wälzlageringelinge oder auch Radnaben werden heute vorzugsweise auf Warmmehrstufenpressen gratlos gefertigt. Der große Bedarf derartiger Teile im Automobilbau rechtfertigt den Einsatz entsprechend spezialisierter automatisierter Mehrstufenpressen.

*Simple components, such as gear blanks, bearing races or even wheel hubs, are today produced primarily in a flashless process on multi-stage presses. The huge demand for such parts in the field of automotive manufacture justifies the implementation of specialized automated machines.*

Mit Ausbringungen von 60 bis 180 Teilen pro Minute (größenabhängig) können derartige Maschinen vorwiegend rotationssymmetrische Bauteile äußerst rationell produzieren. Bearbeitungsaufmaße und Toleranzen entsprechen denen der Gesenkschmiedeteile.

*With an output of between 60 and 180 parts per minute (dependent on size), such machines are well-equipped to produce high volumes of rotationally symmetric components in an extremely cost-efficient way. Machining allowances and tolerances correspond to those of die-forged parts.*

### 3.3.4 Querkeilwalzen *Cross Wedge Rolling*

Ein weiteres Verfahren, das sich für bestimmte Teilefamilien heute etabliert hat, ist das Querkeilwalzen.

Ursprünglich nur zur Vorformung und Massenverteilung gedacht, wurde das Verfahren in den letzten Jahren durch Weiterentwicklung mehr und mehr auch zur Fertigformung von Getriebewellen eingesetzt.

Das Verfahrensprinzip stellt sich wie folgt dar: Ausgehend von dem größten Materialquerschnitt wird in einen Stabstahlabschnitt durch ein keilförmiges Werkzeug Material in Längsrichtung nach außen gewalzt. Die eigentliche Formgebung erfolgt durch die Form des Keilauflaufs auf der Walze.

Vorzugsweise Vorgelegewellen mit zwei oder mehr Festrädern lassen sich mit diesem Verfahren sehr wirtschaftlich fertigen, da derartige Wellen in einem einzigen Arbeitsgang mit Hinterschnitt in Achsrichtung hergestellt werden können.

Die Aufmaße entsprechen einem Gesenkschmiedeteil. Der Materialabfall ist geringer als beim Gesenkschmieden. Die Kaltumformung erzeugt hier aber Bauteile mit geringem Aufmaß und besserer Werkstoffausnutzung. Gewichtsvermindernde Hinterschnitte zwischen Festrädern sind im Kaltumformteil inzwischen auch auf mechanischen Maschinen sehr wirtschaftlich herstellbar, aber mit gewissen geometrischen Einschränkungen. Dies muss aber im Einzelfall betrachtet werden.

*Cross wedge rolling is another process which has established itself in the production of a particular family of parts.*

*Originally intended to carry out preforming and material distribution tasks, this process has undergone further development and has been used increasingly over the past few years in the production of transmission shafts.*

*The principle behind this process is as follows: starting with the largest material cross section, material in a segment of a steel bar is rolled outwards in a longitudinal direction by means of a wedge-shaped tool. The final shape depends on that formed by the outlet shape of the wedge on the roller.*

*Countershafts with two or more fixed gears represent a particular product group that can be produced very economically using this process. This is due to the fact that such shafts can be manufactured in a single operation with forged undercuts in the axial direction.*

*The allowances are comparable to those of a die-forged component, while material waste is lower. Here, however, cold forging produces parts with low allowances and better material utilization. Weight-reducing undercuts between fixed gears may now be produced, highly cost-efficiently in cold forged parts on mechanical machines, too. Certain geometrical limitations represent the only drawbacks. This needs to be weighed up in each individual case.*

### 3.3.5 Reckwalzen *Reducer Rolling*

Das Reckwalzen ist ein Verfahren des Profillängswalzens.

*Reducer rolling is a profiled longitudinal stretching process.*

Das Werkstück wird zwischen zwei sich bewegenden Werkzeugen, den Walzen, geformt. Der austretende Querschnitt bleibt dabei nicht konstant. Dem Werkstück wird durch die profilierten Walzsegmente in Walzrichtung die geforderte Form aufgezwungen. Häufig wird es als Zwischenform zur besseren Massenverteilung für Gesenkschmiedeteile verwendet. Dies führt zu einer Reduzierung der Gratverluste beim Gesenkschmieden.

*The workpiece is shaped between two moving rollers. The cross section that is generated does not remain constant. The workpiece is forced into the required shape by the profiled roll segments in the rolling direction. The process is often used to produce an intermediate geometry for achieving enhanced mass distribution for die-forged parts, leading to a reduction in flash losses during closed-die forging.*

### 3.3.6 Kaltprägen *Cold Coining*

Dieses Verfahren wird in Maßprägen und Formprägen unterteilt.

*This process can be sub-divided into processes that calibrate a workpiece or produce certain shapes from it.*

Das Maßprägen wird sehr oft zusammen mit anderen Massivumformverfahren eingesetzt. So werden z. B. beim Gesenkschmieden Funktionsflächen erhalten geschmiedet und danach durch Maßprägen (Kalibrieren) in eine engere Toleranz gebracht. Damit lässt sich spanende Nacharbeit vermeiden oder verringern.

*Calibration is very often used in conjunction with other forging processes. During closed-die forging, for example, surfaces that are necessary for the technical function of the part (functional surfaces) are forged so that they are raised and are then given tighter tolerances by means of calibration. In this way, subsequent machining work is reduced or even avoided altogether.*

Beim Formprägen werden bei überwiegend flachen Werkstücken zwischen Stempel und Matrize entsprechende Formelemente ausgeprägt.

*Coining of shapes chiefly involves flat workpieces which are formed between a punch and a die cavity.*

Ein Beispiel hierfür ist das Münzprägen, das bei hohen Mengenleistungen auf vollautomatisierten Prägepressen abläuft. Aber auch das Ausprägen von vorgeschmiedeten Formelementen, wie z. B. Verzahnungen, ist hier zu nennen. Beispiele sind in Kapitel 9 dargestellt.

*An example of this is the minting of coins, which takes place on high-volume fully-automated mint presses. Another example is the calibration of rough-forged parts, such as gears. Examples will be shown in Chapter 9.*

### 3.4 Sonderverfahren *Special Processes*

Für bestimmte Bauteile werden immer wieder Spezialverfahren im Bereich der Massivumformung entwickelt, die die Herstellung dieser Werkstücke in Größtsrie rationell gestalten sollen. Dazu gehören gewisse Präzisionsschmiedeverfahren wie z. B. das Pressen von Ausgleichskegelrädern mit einbaufertiger Verzahnung oder das Pressen von Kupplungsverzahnungen mit Hinterschnitt.

*Special forging processes for certain components are continually being developed with the aim of producing large volumes of parts in a cost-effective manner. Among them are certain precision forging processes, such as the cold forging of differential bevel gears with ready-for-assembly gears, or the pressing of clutch teeth with undercuts.*

Auch das Gratlospressen von Zahnstangen mit veränderlichem Modul (Bishop-Verfahren), das Twisten (Verdrehen) von Kurbelwellen zur Herstellung von Hinterschneidungen bei den Gegengewichten, das Bruchtrennen von Pleueln, das Präzisionsschmieden von Turbinenschaufeln und das Radial-Axial-Ringwalzen zählen zu den Spezialverfahren der Massivumformung, die eng auf das jeweils zu fertigende Teil abgestimmt sind.

*Other special forging processes which are tailor-made to the parts being produced include the flashless pressing of steering racks with variable module (Bishop process), the twisting of crankshafts for the production of undercuts at the counterweights, the crack method used in the manufacture of connecting rods, the precision forging of turbine blades, and radial-axial ring rolling.*

Wenn die Stückzahl groß genug ist, sodass sich die Entwicklung von Spezialverfahren und -maschinen wirtschaftlich lohnt, lassen sich mit den verschiedenen umformtechnischen Methoden im Prinzip nahezu alle Bauteile rationell herstellen.

*As long as the production volume is large enough to justify the costs involved in developing special processes and machines, almost all components can, in principle, be produced in a cost-efficient way using the various metal forging processes described.*



Große Formänderung <i>High strain</i>	⇒	Warm- oder Halbwarmumformung <i>Hot or warm forging</i>
Schlecht umformbare Werkstoffe: hoher C-Gehalt, hohe Legierung <i>Materials difficult to form: High carbon content, high-alloyed</i>	⇒	Warm- oder Halbwarmumformung <i>Hot or warm forging</i>
Umformung mit Grat <i>Forging with flash</i>	⇒	Warmumformung <i>Hot forging</i>
Bessere Oberflächenqualität und kleinere Toleranzen als bei der Warmumformung <i>Better surface quality and lower tolerances than in hot forging</i>	⇒	Halbwarm- oder Kaltumformung <i>Warm or cold forging</i>
Wellenförmig mit Flansch <i>Shaft shape with flange</i>	⇒	Kaltumformung oder Halbwarmumformung <i>Cold forging or warm forging</i>
Hohe Formänderung und zusätzlich genaue Flächen <i>High strain and additionally some exact surfaces</i>	⇒	Warm-, Halbwarm- und Kaltumformung (Kombinationsverfahren) <i>Hot, warm and cold forging (Combination processes)</i>
Sonderformen <i>Special geometries</i>	⇒	Umformungs- und Zerspanungsvorgänge <i>Forging and cutting processes</i>

Abb./Fig. 3.4: Vereinfachter Kriterienkatalog zur Auswahl des richtigen Herstellungsprozesses  
*Simplified catalog of criteria for selecting the optimum production process*

### 3.5 Kriterien der richtigen Verfahrensauswahl *Criteria for Selecting the Optimum Process*

Die verschiedenen Verfahren der Massivumformung wurden eingehend in diesem Kapitel beschrieben.

*This chapter has outlined the various forging processes in detail.*

Die unterschiedlichen Umformarten wie Warm-, Halbwarm- und Kaltumformung und deren Verfahrenskombination erlauben eine Vielzahl von Möglichkeiten zur Erstellung des Fertigteils. Diese werden in den nächsten Kapiteln genauer beschrieben.

*The different types of forging processes, such as hot, warm and cold forging, as well as combinations thereof, allow a multitude of possibilities for producing the finished part. These will be outlined in more detail in the following chapters.*

Die Tabelle in Abb. 3.4 soll einen kleinen Überblick geben, inwieweit welche Umformart am geeignetsten erscheint.

*The table in Fig. 3.4 should provide a brief overview of which forging process seems the most suitable in each individual case.*

Eine optimale Kombination der passenden Einzelverfahren kann jedoch nur in Abstimmung mit einem erfahrenen Umformunternehmen erfolgen.

*An optimum combination of the individual processes can only be determined reliably, however, in collaboration with an experienced forging company.*

Nur so kann auch - unter Berücksichtigung der Qualitätsanforderungen - die kostengünstigste Prozesskombination bestimmt werden.

*Only this enables a cost-efficient process combination to be found that also takes quality requirements into account.*

## 4 Warmumformung

### *Hot Forging*

Ein wesentliches Unterscheidungsmerkmal innerhalb der verschiedenen Massivumformverfahren ist die Temperatur der Abschnitte zu Beginn des Umformprozesses.

*A major differentiating factor between the various forging processes is the temperature of the billets at the start of the forging process.*

In diesen und den folgenden Kapiteln sollen die Massivumformverfahren aus Sicht der Umformtemperatur und den dadurch gegebenen Besonderheiten vorgestellt werden.

*In this chapter and the ones that follow, forging processes will be presented based on the forging temperature and the characteristics that this gives rise to.*

### 4.1 Grundlagen

#### *Fundamentals*

Bei der Warmumformung werden die Abschnitte auf eine Temperatur erwärmt, bei der Erholungs- und Rekristallisationsvorgänge während und direkt nach der Umformung ablaufen. Dadurch werden Kraftbedarf und Spannungen herabgesetzt und das Umformvermögen des Werkstoffs vergrößert.

*In the case of hot forging, the billets are heated to a temperature at which recovery and recrystallization processes occur during and directly after forging. At these temperatures, flow stress, and consequentially the force required for forging, is reduced, while the formability of the material is improved.*

Bei Stahlwerkstoffen liegt die Ausgangstemperatur für die Warmumformung üblicherweise bei ca. 1.200°. Traditionell wird dieses Verfahren auch als Schmieden bezeichnet. Das Schmieden umfasst gemäß Definition das Fertigen durch Umformen, Trennen und Fügen mit Anwärmen der Abschnitte (siehe Kapitel 3). Die Schmiedeverfahren selber teilen sich auf in das Freiformschmieden und in das Gesenkschmieden.

*Materials made of steel are usually heated up to a starting temperature of approx. 1,200° for hot forging. By definition, hot forging encompasses metal forming, separation and joining processes that involve heating the billets (see Chapter 3). The forging processes themselves are subdivided into open-die and closed-die forging.*

Kennzeichnend für das Gesenkschmieden sind die formgebenden Werkzeughälften (die Gesenke), zwischen denen das Werkstück ausgepresst wird.

*The distinguishing feature of closed-die forging are the tools (dies) between which the workpiece is pressed.*

Auch das Gesenkschmieden ohne Grat wird zunehmend eingesetzt, vorzugsweise auf automatisierten Mehrstufenpressen. Dieses spezielle Verfahren eignet sich insbesondere für Werkstücke, die in sehr hohen Stückzahlen produziert werden.

*Closed-die forging without flash is being used increasingly, particularly on automated multi-stage presses. This specialized process lends itself particularly well to parts produced in large quantities.*

Die Werkzeughälften müssen beim Gesenkschmieden bereits die Negativform des fertigen Werkstücks aufweisen und sind deshalb in der Herstellung teuer. Da sie nur zur Herstellung einer einzigen Werkstückform dienen, ist für einen wirtschaftlichen Einsatz dieses Verfahrens eine bestimmte Mindeststückmenge erforderlich.

*Because the dies have the negative shape of the finished part, they are expensive to produce. As each tool set can only produce one particular part shape, their use can only be justified in economic terms when a minimum number of pieces is guaranteed.*

Häufig lässt sich die Endform nicht durch einen einzigen Umformvorgang erreichen. Muss ein Abschnitt, um die Endkontur zu erreichen, mehrfach umgeformt werden, so spricht man von Mehrstufenprozessen. Die Umformstufen werden in Massenvorverteilung und Hauptumformung unterteilt.

*Frequently, the final shape cannot be achieved with a single metal forging operation. If a workpiece needs to be formed multiple times to achieve the desired final contour, this is referred to as a multi-stage process. The metal forging stages are divided into mass predistribution and main forging.*

Zur Massenvorverteilung werden die Verfahren Stauchen und Fließpressen eingesetzt. Je nach Werkstück kann auch in einem vorgelagerten Prozess reck- oder quergewalzt werden.

*Upsetting and extrusion are processes used for mass predistribution. Depending on the workpiece, reducer rolling or cross rolling may also be employed during an upstream process.*

Zum Trennen des Werkstoffs bei Schmiedetemperatur werden zumeist die Verfahren Abschnneiden, Abgraten und Lochen in den Prozess integriert.

*Separation processes on the material at forging temperature are usually carried out by the integration of cutting, trimming and piercing operations.*

Die Wirtschaftlichkeit von Losgrößen hängt jeweils sehr stark vom angewandten Schmiedeverfahren und der Größe des Bauteils ab:

*The cost-efficiency of production runs greatly depends on the forging process employed and the size of the component:*

Durch Freiformschmieden lassen sich auch einzelne Werkstücke mit einem Stückgewicht von mehreren Tonnen wirtschaftlich herstellen, während sich auf horizontalen automatisierten Warmumformpressen je nach Gewicht 70 - 180 Teile pro Minute herstellen lassen.

Generell sind die Herstellkosten für Schmiedeteile in Abhängigkeit von verschiedenen Einflussgrößen zu betrachten und zu bewerten.

*With open-die forging, it is even possible to economically produce individual workpieces with a weight of several tons per piece; on automated horizontal hot forging presses, 70 - 180 parts per minute may be produced depending on weight.*

*In general, the production costs for forged parts need to be viewed and evaluated by considering their dependence on the various influencing variables.*

Kostenblock Costs	
Materialkosten <i>Material costs</i>	~ 30% - 50%
Werkzeugverschleißkosten <i>Costs associated with tool wear</i>	~ 10%
Rüst- bzw. Einbaukosten <i>Set-up and installation costs</i>	~ 5%
Fertigungskosten <i>Production costs</i>	~ 30% - 50%
Ausschuss und Nacharbeit <i>Rejects and subsequent repair</i>	~ 2% - 5%
Verwaltungs- und Vertriebskosten <i>Administrative and sales costs</i>	~ 5% - 10%

Abb./Fig. 4.1: Kostenblöcke bei der Warmumformung  
*Costs incurred by hot forging*

Abb. 4.1 zeigt die prozentualen Anteile der bei der Warmumformung auftretenden Kostenblöcke.

*Fig. 4.1 shows a breakdown by percentage of the costs associated with hot forging processes.*

Durch die automatisierte Fertigung eines Bauteils oder einer Teilefamilie lassen sich die anteiligen Personalkosten bei den reinen Fertigungskosten reduzieren. Die Investitionskosten sind je nach Automatisierungsgrad entsprechend größer.

*By automating the production of a part, or a family of parts, the labor costs, which make up a share of the pure production costs, can be reduced. Naturally, however, the higher the level of automation, the higher the investment costs are.*

Der Kostenvorteil einer Automatisierung ergibt sich deshalb durch eine höhere Ausbringung. Je nach Maschinentyp, Bauteil und Automatisierungsgrad sind Taktzeiten von unter einer bis zu zehn Sekunden zu erreichen.

*Cost benefits through automation can only be drawn therefore when the output is sufficiently high. Depending on machine type, component and the degree of automation, cycle times of between one and ten seconds can be achieved.*

## 4.2 Maschinen und Umfeld *Machines and Peripheral Equipment*

Der Gesenkschmiedeprozess ist gekennzeichnet durch die Herstellung des Abschnitts, dessen Erwärmung, der Vorverteilung des Materials, dem eigentlichen Hauptumformvorgang und dem abschließenden Abgraten. Je nach Bauteil, Abschnitt und Prozessführung kann die Materialvorverteilung oder das Abgraten entfallen.

*Closed-die forging processes encompass the production of a billet, then heating it, predistributing the material, carrying out the actual principal metal forging operation, as well as trimming during the finishing stage. Depending on the component, the billet and the procedure used, material predistribution or trimming may not be necessary.*

Die Auswahl der Maschinen für Vor- und Nachbearbeitung sowie für den eigentlichen Umformprozess richtet sich immer nach dem Ablauf des Umformvorgangs, den Merkmalen des Werkstücks und der zu fertigenden Stückmenge.

*The choice of machine for pre- and post-operations, as well as for the actual metal forging process, is always dependent on the type of metal forging operation, the properties of the workpiece material, and the number of pieces to be produced.*

Weiterhin bestimmen der Umfang der Automatisierungsmöglichkeiten, die Qualifikation der Arbeitskräfte und der zur Verfügung stehende Maschinenpark und dessen Auslastung den Wirtschaftlichkeitsgrad einer Teilefertigung.

*Furthermore, the cost-efficiency of manufacturing is determined by how far the process can be automated, by labor skills, as well as by the machinery available and its capacity.*

Nur bei Größtserien, bei denen auf einer Umformlinie ein einziges Bauteil oder eine sehr eng begrenzte Teilefamilie gefertigt wird, lohnt es sich, in spezielle Anlagen zu investieren. Hier richtet man sich dann mit spezifischen Werkzeugsystemen, bestimmten Prozessen zur Materialvorverteilung etc. ein. Die Flexibilität einer Linie wird damit aber signifikant eingeschränkt. Die Herstellung ist dann aber besonders wirtschaftlich.

*It is only worth investing in specialized machinery in the case of high volume production runs during which only one type of component, or a limited family of parts, is produced on a metal forging line. In such cases, specific tool systems or certain processes for material pre-distribution, etc. are set up. Although this limits the flexibility of a line considerably, particularly cost-efficient production is attained.*

Zur Vorbereitung der Abschnitte werden Knüppel- oder Stabstahlscheren, Kreis- oder Bandsägeautomaten eingesetzt. Die Erwärmung der Abschnitte erfolgt heute überwiegend in induktiven Erwärmungsanlagen, die auch zur partiellen Erwärmung eingesetzt werden können.

*To prepare the billets for forging, billet or bar steel shears may be used, or else automatic circular saws or automatic bandsaws. Heating of the billets is usually carried out in an induction heater. Induction heating can also be used to heat a limited region of the workpiece.*

Das Scheren kann sowohl kalt als auch warm durchgeführt werden. Automatisierte Schervorrichtungen im Arbeitsbereich des Umformaggregats finden Verwendung bei vollautomatischen Anlagen. Diese erreichen dadurch geringste Durchlaufzeiten.

*Shearing can be performed hot or cold. Automated shearing fixtures integrated in the metal forging unit are used in fully automated facilities, thereby achieving minimum throughput times.*

Findet die Massenvorverteilung außerhalb des eigentlichen Umformaggregats statt, so kommen hier häufig Reck- oder Querwalzen oder spezielle Vorfornpressen zum Einsatz.

*If material redistribution occurs outside of the actual forging unit, reducer rolling, cross rolling or special preforming operations can be employed.*

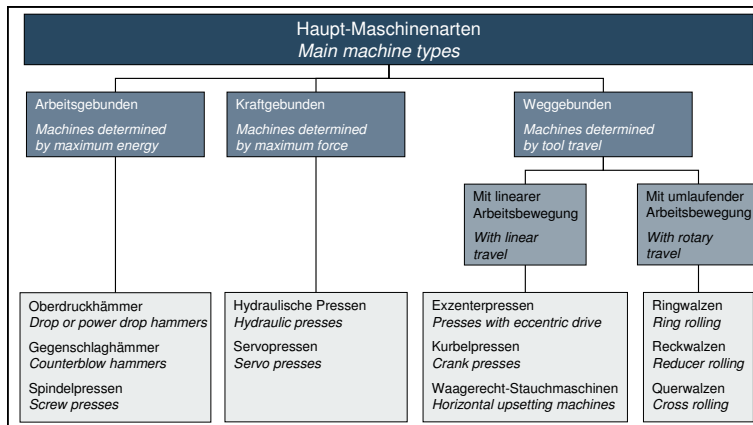


Abb./Fig. 4.2: Maschinenarten für die Warmumformung  
*Types of machines for hot forging*

Bei den eigentlichen Umformmaschinen unterscheidet man in Bezug auf das Antriebssystem zwischen den arbeitsgebundenen, den kraftgebundenen und zwischen den weggebundenen Maschinen.

Bei den arbeitsgebundenen Umformmaschinen wird das gesamte zur Verfügung stehende Arbeitsvermögen bei jedem Arbeitsspiel umgesetzt. Der auf einer arbeitsgebundenen Maschine durchgeführte Vorgang kommt dann zum Stillstand, wenn das zur Verfügung stehende Arbeitsvermögen erschöpft ist. Typische arbeitsgebundene Maschinen sind Hämmer oder Spindelpressen.

Demgegenüber steht bei den kraftgebundenen Maschinen, hydraulischen Pressen, unabhängig von der jeweiligen Stößelstellung jederzeit die größtmögliche Presskraft zur Verfügung.

Durchläuft der Stößel einen von der Maschinenkinematik des Hauptantriebs festgelegten Weg, wie z. B. bei Kurbelpressen, so spricht man von weggebundenen Pressen. Diese Maschinengruppe lässt sich gemäß Abb. 4.2 noch in Maschinen mit linearer oder umlaufender Arbeitsbewegung unterteilen.

Aktuell finden direktangetriebene mechanische Servopressen Eingang in die Pressentechnologie der Massivumformung. Dabei treiben Servomotoren über ein Getriebe die beweglichen Pressenelemente an, und das Schwungrad, in dem konventionell die Umformenergie gespeichert wurde, entfällt. Gemäß der o. g. Einteilung können diese Pressen in die Kategorie der kraftgebundenen Umformmaschinen eingeordnet werden. Vom Aufbau her ähneln diese Pressen aber den Exzenter- oder Spindelpressen.

*Based on the drive system used by the forging unit, machines can be subdivided into three types: energy limited, force limited, and tool travel limited.*

*In the case of machines limited by the maximum possible energy, the total available working energy is utilized with every blow. A process carried out on such a machine thus comes to a standstill when the available ram energy is exhausted. Typical examples of these machines are hammers or screw presses.*

*By contrast, hydraulic presses, which are limited by the maximum force, are capable of exerting maximum force at any point along the press stroke.*

*If the ram travels a path defined by the machine kinematics of the main drive, as is the case with crank presses, the machine is limited by tool travel. As shown in Fig. 4.2, machines limited by tool travel can be further subdivided into machines with linear or orbital paths.*

*Currently, direct-drive mechanical servo presses are finding their way into forging press technology. Via a transmission, the servo motors drive the moving press elements, thereby eliminating the need for the flywheel, conventionally used for storing forging energy. According to the classification outlined above, these presses fall under the category of force limited forging machines. In their setup, however, these presses are similar to eccentric or spindle presses.*



Maschinentyp		Machine Type	
Eigenschaften	Teilespektrum	Characteristics	Spectrum of Parts
Hämmer		Hammers	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Niedrige Investitionskosten</li> <li>• Geringe Rüstzeiten</li> <li>• Kurze Druckberührungszeiten</li> <li>• Hohe Schlagenergie</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Flache Gesenkschmiedestücke</li> <li>• Pleuelstangen</li> <li>• Hebel</li> <li>• Flansche</li> <li>• Ringe</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Low investment costs</li> <li>• Brief set-up times</li> <li>• Brief workpiece contact times</li> <li>• High impact energy</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Flat closed-die forgings</li> <li>• Connecting rods</li> <li>• Levers</li> <li>• Flanges</li> <li>• Rings</li> </ul>
Spindelpressen		Screw presses	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Große Arbeitshübe</li> <li>• Kurze Rüstzeiten</li> <li>• Gute Automatisierbarkeit</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Flanschwellen</li> <li>• Zahnräder</li> <li>• Antriebs-/Abtriebswellen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Large strokes</li> <li>• Brief set-up times</li> <li>• Easily automated</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Flanged shafts</li> <li>• Gears</li> <li>• Input/output shafts</li> </ul>
Hydraulische Pressen		Hydraulic presses	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kraft über gesamten Umformweg</li> <li>• Umformweg und Kraft voneinander unabhängig</li> <li>• Große Arbeitshübe</li> <li>• Lange Druckberührzeit</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Warmfließpressteile</li> <li>• Hülsen</li> <li>• Napfteile</li> <li>• Getriebewellen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Maximum force across the entire tool travel</li> <li>• Tool travel and force independent of each other</li> <li>• Large strokes</li> <li>• Long workpiece contact time</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hot-extruded parts</li> <li>• Cups</li> <li>• Hollow parts</li> <li>• Transmission shafts</li> </ul>

Abb./Fig. 4.3: Teilespektrum der verschiedenen Maschinenarten  
*Spectrum of parts produced with the various machine types*

Alle Maschinenarten haben bestimmte technologische Besonderheiten, die zur Herstellung eines bestimmten Teilespektrums ausgenutzt werden. In den Abb. 4.3 und 4.4 sind typische Anwendungsfälle den verschiedenen Maschinenarten zugeordnet.

*All machine types have certain technological properties which can be utilized in the production of a particular range of components. Fig. 4.3 and 4.4 show the typical areas of application for the various machine types.*

Je nach Prozess werden hierfür besondere Umformmaschinen bereitgestellt. Nach der Hauptumformung können sich auch weitere Umformvorgänge wie z. B. das Twisten von Kurbelwellen oder das Warmkalibrieren anschließen. Diese Fertigungsstufen finden auf gesonderten Aggregaten statt.

*Depending on the process, special metal forging machines are used for this purpose. Following the principal forging operation, other metal forging steps, such as the twisting of crankshafts or hot calibration, can be carried out on separate equipment.*

Den letzten Fertigungsschritt bildet meist die Wärmebehandlung. Zur Erzielung bestimmter Festigkeiten kann bei speziellen Stählen die Wärmebehandlung aus der Umformwärme erfolgen.

*Heat treatment is usually the final production step. To obtain desired strengths, heat treatment of special steels may be carried out from the forging heat.*

In diesem Fall müssen die Schmiedestücke auf gesonderten Transportbändern geregelt abgekühlt werden oder sie werden aus der Schmiedehitze abgeschreckt und somit gehärtet.

*In this case, the forgings undergo controlled cooling using separate conveyers, or they are quenched from the forging heat and thus hardened.*

Ansonsten wird die Wärmebehandlung in speziellen Öfen durchgeführt.

*Otherwise, heat treatment is carried out in special furnaces.*

Maschinentyp		Machine Type	
Eigenschaften	Teilespektrum	Characteristics	Spectrum of Parts
Exzenter- und Kurbelpressen		Presses with eccentric drive and crank presses	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Großer Arbeitsraum</li> <li>• Geringe Taktzeiten</li> <li>• Gute Automatisierbarkeit</li> <li>• Hohe Rüstzeiten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Flansche, Naben, Räder</li> <li>• Liegende Wellen und Verteilerrohre</li> <li>• Kurbelwellen</li> <li>• Schwenklager</li> <li>• Achsschenkel</li> <li>• Pleuel</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Large working space</li> <li>• Brief cycle times</li> <li>• Easily automated</li> <li>• Lengthy set-up times</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Flanges, hubs, wheels</li> <li>• Horizontal shafts and common rails</li> <li>• Crankshafts</li> <li>• Steering knuckles</li> <li>• Stub axles</li> <li>• Connecting rods</li> </ul>
Ringwalzen		Ring rolling mills	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Längere Taktzeiten</li> <li>• Große Flexibilität</li> <li>• Geringer Werkzeugaufwand</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ringe</li> <li>• Tellerräder</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Longer cycle times</li> <li>• High degree of flexibility</li> <li>• Low tool efforts</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rings</li> <li>• Ring gears</li> </ul>
Quer- oder Reckwalzen		Cross rolling or reducer rolling mills	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hoher Werkzeugaufwand</li> <li>• Mittlere Taktzeiten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Einfache Wellen</li> <li>• Wellen mit Hinterschnitt</li> <li>• Massenvorverteilung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• High tool efforts</li> <li>• Medium-length cycle times</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Simple shafts</li> <li>• Shafts with undercut</li> <li>• Mass predistribution</li> </ul>

Abb./Fig. 4.4: Teilespektrum der verschiedenen Maschinenarten  
*Spectrum of parts produced with the various machine types*

Die unterschiedlichen Wärmebehandlungen werden im Kapitel 10 erklärt.

*The various heat treatment processes are explained in Chapter 10.*

Abschließend werden die abgekühlten Werkstücke noch durch Strahlen mit Stahlkies entzündert.

*As a final step, the cooled workpieces are descaled by means of blasting with steel shot.*

Bei einer ausreichend hohen Stückzahl des zu fertigenden Bauteils werden die einzelnen an der Herstellung beteiligten Aggregate durch entsprechende automatische Transfereinrichtungen verkettet.

*With a sufficiently large production run of a particular component, automatic transfer systems can be used to link the individual production units with each other.*

Innerhalb der Presse werden dazu meist Hubbalken- oder Greifersysteme, bei größeren Teilen auch Roboter eingesetzt.

*Within the press, walking beam or gripper systems are mostly used, while robots are implemented for larger parts.*

Wichtig bei der Verwendung von automatischen Transportsystemen ist immer eine Abstimmung mit den Auswerfersystemen der Umformmaschinen. Ist die Stückzahl zu gering oder ist ein sicheres Greifen der Schmiedestücke nicht gewährleistet, muss der Transfer manuell erfolgen.

*When using automatic transfer systems, it is important to coordinate their movement with the ejector systems of the metal forging machines. If the number of pieces is too small, or if secure gripping of the forgings cannot be guaranteed, the transfer must be carried out manually.*

Im Allgemeinen wird die Maßhaltigkeit der Umformteile mit statistischen Methoden überwacht, idealerweise direkt während der Produktion.

*The dimensional accuracy of the forged parts is generally monitored using statistical methods, as far as possible directly during production.*

Je nach Kundenforderung und späterem Einsatzgebiet werden die Teile in der Endfertigung auf Risse, Werkstoffverwechslung, Festigkeit und Maßhaltigkeit geprüft.

*Depending on the wishes of the customer and on the intended area of application, the parts can also be tested in a final production stage for correct material, cracks, strength and dimensional accuracy.*

### **4.3 Formgebung und Toleranzen** ***Shaping and Tolerances***

Als Grundlage für die Gestaltung von Gesenkschmiedeteilen dienen die DIN 10243 und DIN 10254. Die Form muss einerseits die Art der Beanspruchung des fertigen Bauteils berücksichtigen, andererseits umformgerecht sein und zuletzt eine gute spanende Bearbeitung des Massivumformteils ermöglichen.

*DIN 10243 and DIN 10254 provide the basis for the design of closed-die parts. The design of forgings must not only take into account the loads the finished part will experience in service, but must also be suitable for the forging process to be used and ensure that the forged part has good machining properties.*

Eine beanspruchungsgerechte Gestaltung bezieht sich neben der Funktionsgeometrie insbesondere auf die Festigkeit des Bauteils, die sich durch Wahl des Werkstoffs und des Umformverfahrens einstellen lässt.

*In order to create a design that takes the operating conditions into account, it is necessary to consider the functional geometry and, above all, the strength of the component. The latter can be determined by the choice of material and metal forging process.*

Bei schwingend beanspruchten Bauteilen kann die Festigkeit durch einen optimierten Faserverlauf gesteigert werden, indem der Abschnitt, die Zwischenstufen und das Schmiedeteil gezielt aufeinander abgestimmt werden.

*For components that are subjected to fatigue stress, optimization of the fiber flow can increase the strength. This can be achieved by targeted consideration of the billet, the intermediate stages and the forged part.*

Um Schmiedefehler zu vermeiden und den Umformwiderstand zu senken, müssen scharfe Kanten und schroffe Querschnittswechsel vermieden werden.

*In order to avoid faults during forging and to lower forging forces, sharp edges and abrupt changes in cross section need to be avoided.*

Um ein zu schnelles Abkühlen des Bauteils zu verhindern, sollten Böden und Wände nicht zu dünn gestaltet werden. Zu dünne Querschnitte, vor allem in Bewegungsrichtung des Werkzeugs, lassen zudem die Schmiedekräfte sehr stark ansteigen.

*Preventing the component from cooling too rapidly can be achieved by ensuring that the cross section in all directions is not too thin. If they are too thin, particularly in the direction of tool movement, pronounced increase in the forging forces also occur.*

Das Lösen der Schmiedestücke aus dem Gesenk wird durch Seitenschrägen erleichtert. Die Maßhaltigkeit der Schmiedestücke wird durch Schwinden und Gesenkmaßänderungen beeinflusst und lässt sich durch entsprechende Toleranzen einhalten.

*Die drafts are used to assist in releasing the forging from the die. The dimensional accuracy of the forgings is affected by thermally induced workpiece shrinkage and dimensional changes in the dies. With appropriate pre-correction tolerances, however, dimensional accuracy can be achieved.*

Die erreichbaren Toleranzen von Schmiedestücken hängen von der Gesenkbelastung und damit eng verbunden mit dem Verschleiß der Gesenke, vom Gesenkversatz zwischen Ober- und Unterwerkzeug und von der insbesondere bei hohen Temperaturen starken Zunderbildung und Schwindung beim Abkühlen ab.

*Forging tolerances depend on the die load and associated die wear, die alignment between the upper and lower tools, the pronounced scale formation that occurs particularly at high temperatures, as well as the shrinkage during the cooling period.*

Die Grundlage für Toleranzen und zulässige Abweichungen für Gesenkschmiedestücke sind in der DIN-EN 10243 standardisiert. Bei den Toleranzklassen werden zwei Schmiedegüten unterschieden: Schmiedegüte F mit Toleranzen von ausreichender Genauigkeit für die meisten Anwendungen und Schmiedegüte E mit engeren Toleranzen, deren Einhaltung einen größeren Werkzeug- und Fertigungsaufwand erfordert.

Dabei entsprechen die Schmiedegüten E und F den Toleranzklassen IT 14 bis IT 16. Die hohen Anforderungen, die heute an die Verarbeitung und Funktion der Bauteile gestellt werden, erfordern aber häufig die Vereinbarung von Sondertoleranzen. Hierbei sind bereits bei der Toleranzfestlegung die Spann- und Anlageflächen zu berücksichtigen.

In Ausnahmefällen können Genauigkeiten bis zur Toleranzklasse IT 8 erreicht werden (z. B. durch anschließendes Maßprägen).

Die Bearbeitungszugaben für Flächen lassen sich nicht pauschal angeben. Sie sind sehr stark vom Schmiedeverfahren abhängig. So beträgt das Aufmaß bei großen Freiformschmiedestücken bis zu 20 mm, bei Near-Net-Shape-Flächen an präzisionsgeschmiedeten Bauteilen teilweise weniger als 1 mm. Üblicherweise sind bei Gesenkschmiedestücken Aufmäße von 1,5 mm bis 2 mm pro Fläche vorzusehen.

Je früher aber im Entwicklungsprozess eines Bauteils Funktionsflächen, Spann- und Anschlagpunkte und mögliche Toleranzen zwischen Endkunde, Zerspaner und Massivumformer abgestimmt werden, desto größer sind die möglichen Kosteneinsparungen in der gesamten Prozesskette.

*The basis for tolerances and permissible deviations for die-forged parts are standardized in DIN-EN 10243. Two tolerance classes are in place: forging grade F with sufficient tolerance accuracy for most applications, and forging grade E with tighter tolerances, demanding greater precision in tools and production.*

*Forging grades E and F correspond to the tolerance classes IT 14 to IT 16. The great demands now placed on the processing and functionality of components, however, frequently means that special tolerances must be agreed upon. The clamping and contact surfaces must be considered when establishing tolerances.*

*It is possible in some cases to achieve accuracies of up to tolerance class IT 8 (e. g. using subsequent calibration processes).*

*The machining allowances for surfaces cannot be given as a general figure, as they depend to a large extent on the forging process. Thus the allowance for large open-die forgings can be up to 20 mm, whereas in the case of near-net-shape surfaces on precision-forged components, it can sometimes be less than 1 mm. With die-forged parts, allowances of between 1.5 mm and 2 mm per surface are usually designated.*

*However, the earlier functional surfaces and permissible tolerances are agreed upon by the end customer and the machining and forging company, the greater the potential cost savings across the entire process chain.*

## 4.4 Teilespektrum *Spectrum of Parts*

Schmiedeteile sind wegen ihrer guten Werkstoffeigenschaften, der hohen Prozesssicherheit bei ihrer Fertigung und den guten Prüfungsmöglichkeiten sichere und zuverlässige Bauteile. Sie kommen überall dort zum Einsatz, wo insbesondere Zuverlässigkeit und Lebensdauer bei hoher Leistungsdichte eine wesentliche Rolle spielen.

*Forgings are failure-safe and reliable components due to their favorable material properties, the high repeatability of the process during their production, as well as the good testing possibilities. They are implemented anywhere where reliability and service life at high power density or high stresses play an important role.*

### 4.4.1 Teile für Motor und Kraftstoffeinspritzung *Parts for Engine and Fuel Injection*

Als Beispiele für längsachsenorientierte Bauteile sind in Abb.4.5 (links) zwei verschiedene geschmiedete Massivumformteile für ein Common-Rail-Einspritzsystem dargestellt.

*Two different forgings for a common rail injection system are shown in Fig.4.5 (left) as examples of components with a longitudinal axis.*

An diesen Bauteilen lässt sich sehr schön erkennen, wie sich durch die Formgebungsmöglichkeiten der Schmiedetechnik auch Leichtbaupotenziale erschließen: Die geringer belasteten Bauteilbereiche können mit bedeutend geringerem Durchmesser geschmiedet werden.

*These parts are a good example of how shaping possibilities in forging technology also hold potential for lightweight design: The regions of the part with a lower load can be forged with a considerably smaller diameter.*

Die belastungsorientierte Geometrie mit zahlreichen gewichtssparenden Durchmesserreduzierungen wäre als gebautes Rail auf Basis eines Rohrs nicht herstellbar.

*A load-oriented geometry with several weight-saving diameter reductions cannot be manufactured as an assembled rail from tube material.*



Abb./Fig. 4.5: Teile aus Motor und Kraftstoffeinspritzung  
*Parts from the engine and fuel injection system*

Langschmiedeteile, zu denen auch Nockenwellen gehören (siehe Abb. 4.5, rechts unten), werden üblicherweise in einem mehrstufigen Schmiedevorgang hergestellt und abschließend abgegratet. Diese Bauteile müssen bei kleinster Baugröße enorme Wechselbelastungen aufnehmen und werden daher vorteilhaft durch Schmieden hergestellt. Geringer belastete Nockenwellen werden aber inzwischen aus Rohren gebaut.

Leistungssteigerung einerseits sowie Verbrauchsreduzierung und höherer Komfortanspruch andererseits führen dazu, dass moderne Motoren neben den klassischen Schmiedeteilen Pleuel und Kurbelwelle zusätzliche umgeformte Komponenten verlangen.

Zwei Beispiele dafür sind die in Massenausgleichsgetriebenen eingebauten Ausgleichswellen (siehe Abb. 4.5, Mitte) zur Steigerung der Laufruhe.

*Longitudinal parts, to which camshafts also belong (see Fig. 4.5, lower right), are usually produced in a multi-stage forging process and subsequently trimmed. These parts need to be able to absorb enormous alternating stresses with the smallest possible structural size. It is therefore advantageous to produce them by forging. Camshafts with lower load requirements, however, are increasingly being manufactured as assembled designs from tube.*

*Increases in performance on the one hand as well as a reduction in consumption and greater levels of comfort on the other, mean that modern engines demand other forged components besides the classic connecting rod and crankshaft.*

*An example of other forged components are balancer shafts assembled in mass balancing systems (see Fig. 4.5, center) for increasing running smoothness.*

Diese Bauteile wurden von einer Gleit- auf eine reibungsminimierende Wälzlagerung umgestellt, wobei die Welle als Innenring fungiert. Durch die Integration der Lagerungsfunktion in das Bauteil wird die Montage vereinfacht und damit Kosten eingespart. Ein geschmiedeter Stahl gewährleistet hier die Wälzfestigkeit.

*The hydrodynamic bearings on these parts were replaced by anti-friction bearings, thus reducing frictional losses, with the shaft acting as the inner race. By integrating the bearing function in the component, assembly is simplified, thus leading to cost savings. Forged steel ensures the strength of this friction-reducing bearing.*

Exzenterwellen (siehe Abb.4.5, rechts oben) zur vollvariablen Ventilsteuerung erfüllen höchste Anforderungen an Genauigkeit. Die Monoblock-Gestaltung zusammen mit dem für geringsten Verzug ausgewählten Werkstoff ermöglicht es, ein hochpräzises Bauteil wirtschaftlich in Großserie herzustellen.

*Eccentric shafts (see Fig. 4.5, upper right) for fully variable valve control fulfill the highest precision requirements. The monoblock design together with the material selected for minimizing distortion allows a high-precision part to be produced economically in large-series production.*

#### 4.4.2 Teile aus verschiedensten Anwendungen *Parts from Various Applications*



Abb./Fig. 4.6: Teile aus verschiedensten Anwendungen  
*Parts from various applications*



Nachdem heute schon in großem Umfang geschmiedete Stahlkolben in Lkw-Anwendungen anzutreffen sind, wird der Stahlkolben (Abb. 4.6, links oben) in den nächsten Jahren im Pkw-Bereich Anwendung finden. Steigende Verbrennungstemperaturen und -drücke erfordern hier den Umstieg von Aluminium auf Stahl. Der geschmiedete Kolben stellt im Vergleich mit anderen Fertigungsverfahren die kostengünstigste Lösung dar. Im dargestellten Bauteil wird dabei sogar ein innenliegender Kühlkanal in einem einteiligen Kolben eingeschmiedet.

Ein weiteres typisches Schmiedeteil sind Radnaben (Abb. 4.6, rechts). Sie sind sehr wirtschaftlich auf automatisierten Mehrstufenexzenterpressen mit integrierter Lochstufe herstellbar und anschließend durch eine gesteuerte Abkühlung wärmebehandelt. Rechts oben werden wiederum die Formgebungsmöglichkeiten der Warmumformung zur Erzielung einer Leichtbaulösung voll ausgenutzt.

Als Werkstoff werden oft ausscheidungshärtende ferritisch-perlitische Stähle (AFP-Stähle) verwendet. Diese Radnaben werden aufmaß- (geringe Bearbeitungszugaben) und gewichtsreduziert entwickelt und weisen eine Zugfestigkeit von 1.000 MPa auf.

Bei dem Pumpengehäuse (siehe Abb. 4.6, links unten) wurde auf eine ideale Werkstoffverteilung und einen optimalen Faserverlauf geachtet. Das Gefüge wird speziell für die weitere Zerspanung eingestellt.

Weitere Beispiele komplexer Formgebung sind das Tellerrad mit vorgeschmiedeter Verzahnung und der Lager-Außenring (siehe Abb. 4.6, Mitte).

*In view of the fact that forged steel pistons are already used on a large scale in trucks, it is to be expected that these pistons (Fig. 4.6, upper left) will also find application in cars over the next few years. Increasing combustion temperatures and pressures demand the switch from aluminum to steel. Compared to other production processes, forged pistons represent the most cost-efficient solution. In the part shown, an internal cooling channel has even been forged into a one-piece piston.*

*Another example of a typical forging are wheel hubs (Fig. 4.6, right). They are produced in a very cost-efficient manner on automated multi-stage eccentric presses with an integrated piercing stage. Following this, the only heat treatment necessary is controlled cooling. In the image on the upper right the shaping possibilities of hot forging are fully exploited for achieving a lightweight solution.*

*Dispersion-hardening steels are often used. These wheel hubs are developed with reduced machining allowances and reduced weight. They demonstrate a tensile strength of 1,000 MPa.*

*In the case of the pump housing (Fig. 4.6, lower left), attention was paid to achieving optimum material distribution and fiber flow. The structure is optimized for the subsequent machining operation.*

*Other examples of complex geometries include ring gears with preforged splines and outer races of a bearing (see Fig. 4.6, center).*

# 5 Warmumformung von Aluminium

## *Hot Forging of Aluminum*

### 5.1 Grundlagen

#### *Fundamentals*

Nach Stahl ist Aluminium das am häufigsten verwendete Metall für Massivumformbauteile. Das Leichtmetall vereint optimal die Eigenschaften Festigkeit, geringe Dichte und fertigungstechnische Verarbeitbarkeit. Des Weiteren sind Aluminiumwerkstoffe auch hervorragend recyclebar.

*After steel, aluminum is the most frequently used metal for forged parts. This lightweight metal optimally combines the properties of strength, low density and processability. Furthermore, aluminum alloys are highly recyclable.*

Trotz des höheren (auf die Masse bezogenen) Preises setzt sich geschmiedetes Aluminium für Strukturbauteile immer öfter gegenüber Stahl oder Gussbauteilen durch. Geschmiedetes Aluminium erreicht höchste Festigkeiten bei sehr guten Zähigkeiten. Bei etwa einem Drittel der Dichte von Eisen-Gusswerkstoffen erreicht es gleiche Festigkeiten bei höherer Duktilität. Weitere positive Eigenschaften sind die gute Korrosionsbeständigkeit.

*In spite of the higher price per mass, forged aluminum is increasingly replacing steel or cast parts when producing structural components. Forged aluminum achieves high strengths and very good toughness values. At around a third of the density of cast iron, aluminum demonstrates the same strength properties but with higher ductility. Other positive characteristics include good corrosion resistance.*

Titan weist ein noch größeres Leichtbaupotenzial als Aluminium auf, ist aber in Beschaffung und Verarbeitung deutlich teurer. Geschmiedetes Titan ist deshalb nur im Flugzeugbau in der Anwendung.

*Titanium demonstrates even greater potential when it comes to lightweight design. However, it is considerably more expensive to procure and process. Forged titanium is therefore only used in aircraft construction.*

### 5.2 Maschinen und Umfeld

#### *Machines and Peripheral Equipment*

In dieser Ausarbeitung wird nur die Warmumformung von Aluminium behandelt. Diese findet bei Temperaturen um 500 ° statt.

*This book will focus only on the hot forging of aluminum, which takes place at temperatures of around 500 °.*

Die Abschnitte werden meist gesägt. Ein Scherschneiden wie beim Stahlschmieden wird aufgrund der hohen Duktilität des Aluminiumwerkstoffs nicht eingesetzt, da sich Schergrate bilden würden, die im weiteren Prozessverlauf in die Bauteiloberfläche eingeschmiedet werden könnten.

Nach einer eventuellen Vorformung zur Materialverteilung erfolgt eine Umformung der Teile in Vor- und Fertiggravur. Der Materialüberschuss wird anschließend abgegratet.

Bei der Umformung muss die jeweils kritische Temperatur der Aluminiumlegierung beachtet werden. Diese beträgt zum Beispiel bei AlCuMg (2000er-Legierung) 500 °. Beim Überschreiten können Gefügeschädigungen auftreten. Da sich die Fließspannung  $k_f$  im Bereich üblicher Umformtemperaturen etwa um den Faktor 1,3 je Verzehnfachung der Umformgeschwindigkeit erhöht, werden die Umformgeschwindigkeit und die Umformkräfte dieser Temperatur angepasst.

Große und komplexe Schmiedestücke und solche aus schwierig umformbaren und zugleich überhitzungsempfindlichen Aluminiumlegierungen werden deswegen praktisch ausschließlich mit hydraulischen Schmiedepressen (siehe Abb. 4.3) umgeformt. Diese haben den Vorteil, dass die Umformgeschwindigkeit gut eingestellt werden kann.

Schmiedestücke aus gut umformbaren, hinsichtlich des Überschreitens der Umformtemperatur weniger kritischen Legierungen, wie zum Beispiel AlMgSi (6000er-Legierung), werden auch mit Schmiedehämmern oder mechanischen Pressen gesenkschmiedet (Abb. 4.3 und Abb. 4.4).

*The billets are usually sawn. Shearing cutters used in steel forging are not employed with aluminum due to its high ductility. This would cause shearing flash to form that could then be forged into the component surface during the subsequent process operations.*

*Following possible initial forming to achieve material distribution, the parts are forged in a pre- and finish-die. Any excess material is then trimmed.*

*During forging, the relevant critical temperature of the aluminum alloy needs to be observed. In the case of AlCuMg (2,000 alloy), for example, this temperature is 500 °. If this is exceeded, damage to the grain structure may occur. As the flow stress  $k_f$  rises within the range of usual forging temperatures by around a factor of 1.3 per tenfold increase in the forging speed, the forging speed and the forging forces are adapted to this temperature.*

*For this reason, only hydraulic forging presses (see Fig. 4.3) are used for large and complex forgings as well as those that are difficult to shape, or for aluminum alloys that are sensitive to overheating. The advantage of these presses is that they allow the forging speed to be set easily.*

*Forgings made of alloys that are easy to shape and that are less critical with respect to exceeding the forging temperature, such as AlMgSi (6,000 alloy), are also die-forged using forging hammers or mechanical presses (Fig. 4.3 and Fig. 4.4).*

Die Schmierung der Werkzeuge ist wegen der hohen Reibung zwischen Aluminium und Werkzeugstahl von großer Bedeutung. Schmierung mit in Öl suspendiertem Grafit senkt hier die Reibung auf verträgliche Werte.

*Tool lubrication is highly important due to the considerable friction between aluminum and tool steel. Lubrication using graphite suspended in oil reduces the friction to acceptable values.*

### 5.3 Formgebung und Toleranzen *Shaping and Tolerances*

Die erreichbaren Toleranzen von Aluminiumschmiedestücken liegen zwischen denen der Warm- und Kaltumformung von Stahl und nach ISO-Toleranzklasse im Allgemeinen zwischen IT 12 - 15. Die genauen Grenzabmaße und Formtoleranzen können der EN586-3 2001 »Aluminium und Aluminiumlegierungen - Schmiedestücke« entnommen werden.

*The tolerances that may be achieved with aluminum forgings lie between those attained during the hot and cold forging of steel and in general between IT 12 - 15 according to the ISO tolerance classes. The exact limit deviations and geometrical tolerances may be found in EN586-3 2001 with respect to aluminum and aluminum alloy forgings.*

Auch bei Aluminium-Schmiedeteilen gewährleistet ein gutes Simultaneous Engineering eine hohe Wirtschaftlichkeit der Fertigungsprozesse.

*Good simultaneous engineering processes result in high levels of cost-efficiency in the production of aluminum forgings, too.*

Dank den Eigenschaften des Aluminiums können weitaus komplexere Geometrien (im Vergleich zu Stahl) bei weniger Fertigungsstufen erzeugt werden. Dadurch kann unter bestimmten Umständen eine bereits endkonturnahe Vorform (Near-Net-Shape) erreicht werden.

*The properties of aluminum mean that far more complex geometries (compared to steel) may be produced in fewer production steps. Under certain conditions, this allows parts in near-net-shape to be produced.*

Der beim Schmieden realisierbare, nicht unterbrochene Gefügeverlauf trägt wesentlich zu den guten Festigkeitseigenschaften bei. Aluminium-Schmiedeteile zeichnen sich zudem durch ein homogenes, poren- und lunkerfreies Gefüge und hohe Zähigkeit aus.

*The uninterrupted fiber flow that forging achieves contributes significantly to the good strength properties. Aluminum forgings are also characterized by a homogenous grain structure that is free of pores and contraction cavities, and that demonstrates high levels of toughness.*

Die Wahl geeigneter werkstofflicher Ausgangszustände sowie die Kontrolle und gezielte Veränderung des Werkstoffzustands in der Verarbeitungsprozesskette sind hier maßgeblich entscheidend eine Voraussetzung für berechenbares Verhalten im Einsatz.

*The initial material state as well as the monitoring and targeted alteration of the material state during the process chain are decisive in achieving predictable behavior in the final application.*

## 5.4 Teilespektrum **Spectrum of Parts**

Geschmiedetes Aluminium ist mittlerweile der Premium-Werkstoff für beste Leichtbaumöglichkeiten und wird zunehmend in der Automobilbranche verwendet.

*Forged aluminum is now seen as a premium material for achieving the best lightweight solutions and is being used increasingly in the automotive industry.*

Im Vergleich zu Aluminium, welches in anderen Fertigungsrouten verarbeitet wird, weist der geschmiedete Werkstoff eine sehr hohe Festigkeit bei gleichzeitig hoher Duktilität auf.

*Compared to aluminum processed using other forms of production, the forged variety demonstrates very high strength at high levels of ductility.*

Ein aus Aluminium hergestelltes Pumpengehäuse ist in Abb. 5.1 (Mitte oben) dargestellt. Dieses Bauteil ist als Schmiedeteil absolut lunker- und porenfrei und damit prozesssicher druckdicht - eine aufwendige Dichtheitsprüfung ist nicht notwendig. Die Abwesenheit von Fehlstellen im Werkstoff führt auch zu gutem Tragverhalten von korrosionsschützenden Beschichtungen.

*A pump housing produced from aluminum is shown in Fig. 5.1 (upper center). This component, when forged, is absolutely free of contraction cavities and pores and thus reliably pressure-tight, thereby rendering an elaborate tightness test unnecessary. The absence of flaws in the material also leads to good load bearing behavior of anti-corrosion coatings.*

Darunter befindet sich eine Zentralschraube, eine einschraubige Radbefestigung für einen Sportwagen. Dieses Bauteil hat in der Aluminiumschmiedetechnik seinen Weg vom Rennsport in die Straßenserie gefunden. Die in diesem System notwendige spezielle Radnabe ist ein Stahlwarmschmiedeteil.

*Beneath this is an image of a center screw that enables single-screw wheel mounting for a sports car. In aluminum forging technology, this part has found its way from racing sports to series production for road vehicles. The special wheel hub needed for this system is a hot forged steel part.*



Abb./Fig. 5.1: Warmumgeformte Aluminiumteile  
*Hot forged aluminum parts*

Bei der Umstellung eines Radträgers (Abb. 5.1, links unten), der zuvor in Eisenguss ausgeführt war, konnte mithilfe des geschmiedeten Aluminiums und weiteren konstruktiven Änderungen im System das Gewicht pro Rad von 4,4 kg auf 2,6 kg reduziert werden. Dies entspricht einer prozentualen Gewichtersparnis von 41 %.

In Abb. 5.1, rechts oben, ist ein Schwenklager dargestellt. Dieses Bauteil erfährt eine Vorformoperation durch Reckwalzen und wird dann in einem mehrstufigen automatisierten Schmiedeprozess inklusive Abgraten auf einer Exzenterpresse gefertigt.

Rechts unten in Abb. 5.1 ist ein Kopflager dargestellt. Über dieses Bauteil stützt sich die Karosserie auf dem Fahrwerk ab.

*By using forged aluminum and other design changes to a wheel carrier (Fig. 5.1, lower left) that was previously produced as an iron casting, the weight per wheel was reduced from 4.4 kg to 2.6 kg. This corresponds to a weight saving of 41 %.*

*A steering knuckle is shown at the upper right of Fig. 5.1. This part is preformed by a reducer rolling operation before being produced on an eccentric press during a multi-stage automated forging process that includes trimming.*

*A head bearing is shown on the lower right of Fig. 5.1. The car body is supported on the chassis via this component.*

Dieses geschmiedete Kopflager mit Gummieinlage ist in einer hochmotorisierten Sport-Version eines Fahrzeugs eingebaut, während die niedriger motorisierten Fahrzeuge mit einem gegossenen Bauteil ausgestattet sind.

*This forged head bearing with rubber insert is assembled in highly motorized sport cars, while lower motorized cars are equipped with a cast part.*

Folgende weitere Teile werden bereits in Aluminiumlegierungen geschmiedet: Gabeln für Kardangelenke, Lagerträger und Pumpendeckel (siehe Abb. 5.1). Letztere Bauteile spielen in dieser Anwendung ihren Vorteil der absoluten Druckdichtigkeit aus.

*Other parts already being produced from aluminum alloys include the following: cardan yokes, bearing carriers and pump housing covers (see Fig. 5.1). The latter components have the advantage of absolute pressure-tightness.*

# 6 Halbwarmumformung

## *Warm Forging*

### 6.1 Grundlagen

#### *Fundamentals*

Unter der Bezeichnung Halbwarmumformung versteht die Wissenschaft einen Umformvorgang, bei dem das Werkstück vor Beginn der Umformung nur so weit angewärmt wird, dass bei den gegebenen Umformbedingungen eine bleibende Verfestigung eintritt. Diese Definition bedeutet, dass die Umformung unterhalb der Rekristallisation und bei Stahl somit unterhalb der Austenitumwandlungstemperatur durchgeführt wird.

*Warm forging refers to a metal forging process in which the workpiece is preheated, but not above the temperatures where strain hardening effects are eliminated. According to this definition, the metal forging process is carried out below the recrystallization temperature and thus, in the case of steel, beneath the austenitizing temperature.*

Technisch findet heute aber die Halbwarmumformung von Stahl in einem Temperaturbereich zwischen 700° und 950° statt.

*In industrial practice, however, the warm forging of steel is carried out in a temperature range between 700° and 950°.*

Abb. 6.1 zeigt den Verlauf der Fließspannung, des Formänderungsvermögens und der Zunderbildung über Temperatur für Stahl C45.

*Fig. 6.1 shows how temperature determines the flow stress, formability and scale formation of C45 steel.*

Um 300° befindet sich der Bereich der Blaubruchsprödigkeit, bei dem die Fließspannung leicht ansteigt und die Duktilität absinkt (dynamische Rekalterung).

*At 300° blue brittleness occurs. The yield stress rises and the ductility decreases (blocking of dislocations by carbon diffusion).*

Man erkennt, dass ab 400° ein nennenswerter Abfall der Fließspannung sowie ab 500° ein Anstieg des Formänderungsvermögens gegeben ist und dass die Zunderbildung ab 900° wesentlich ansteigt.

*As can be seen, there is a marked drop in the flow stress above 400°, an increase in formability above 500° and a dramatic rise in scale formation above 900°.*



Technisch und wirtschaftlich sinnvoll ist die Nutzung des Temperaturbereichs ab etwa  $600^\circ$ , da dann das Formänderungsvermögen im Vergleich zur Kaltumformung genügend erhöht ist, um den hohen technischen Aufwand zu rechtfertigen.

*From an engineering and economic point of view, the temperature range above approximately  $600^\circ$  is the most beneficial, as the formability is then great enough (compared to cold forging) to justify the significant levels of engineering effort involved.*

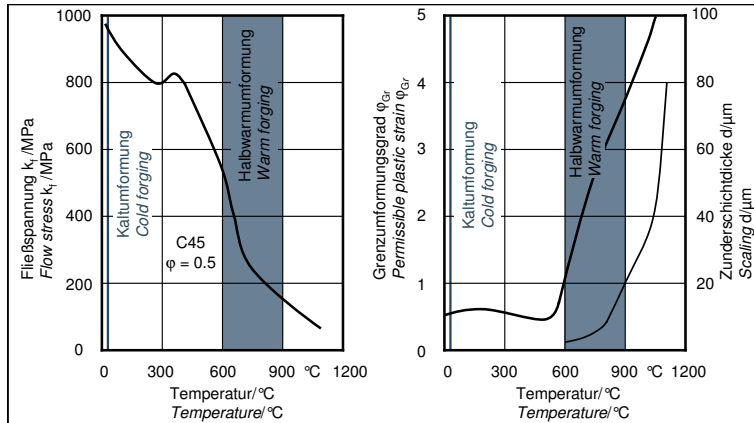


Abb./Fig. 6.1: Zusammenhang zwischen Fließspannung, Grenzumformungsgrad, Zunderbildung (in einer gewissen Zeitspanne) und Temperatur des Stahls C45  
*Relationship between flow stress, permissible plastic strain, oxide formation (within a certain time), and temperature of C45 steel*

Erst seit den 1970er-Jahren wird die Halbwarmumformung für industrielle Anwendungen genutzt. Mittlerweile hat sich ein bestimmtes Produktspektrum herauskristallisiert, das mit diesem Verfahren bevorzugt gefertigt wird.

*Warm forging has only been used in industrial applications since the 1970s. Since that time, this process has proven to lend itself well to the production of a particular range of products.*

Ziel der Halbwarmumformung ist es, die Vorteile der Kaltumformung mit denen des Warmschmiedens zu verbinden.

*The aim of warm forging is to combine the benefits of cold and hot forging.*

Im Vergleich zur Kaltumformung erlaubt die Halbwarmumformung größere Formgebungsmöglichkeiten, im Vergleich zur Warmumformung höhere Genauigkeiten.

Daraus ergibt sich folgendes verfahrenstypisches Teilespektrum: Gefertigt werden vorwiegend rotationssymmetrische Bauteile, ähnlich den Kaltfließpressteilen, aus höherlegierten Werkstoffen, die nicht oder nur eingeschränkt kaltumformbar sind.

Daneben können auch Bauteile, die bisher durch Kaltfließpressen hergestellt wurden und die Zwischenglühoperationen benötigten, durch Halbwarmumformung vergleichsweise rationeller hergestellt werden. Bedingung ist aber eine Erweiterung des Maßtoleranzbereichs.

Die eingesetzten Werkzeuge werden mechanisch deutlich höher beansprucht als bei der Warmumformung. Abb. 6.1 zeigt, dass die Fließspannung bei der Halbwarmumformung immer noch etwa zwei- bis dreimal so hoch ist wie bei der Schmiedetemperatur. Das bedeutet, dass die Werkzeugtechnik sich an jener der Kaltumformung orientieren muss. So müssen die Werkzeuge vorgespannt sein und an Hohlkehlen und bruchgefährdeten Stellen geteilt werden.

Um den Halbwarmumformprozess beherrschbar zu machen, sind im Bereich der Schmierung besondere Vorkehrungen zu treffen. Dabei hat sich eine Kombination von Werkzeug- und Werkstückschmierung bewährt.

*In contrast to cold forging, warm forging offers a wider range of shaping options while, compared to hot forging, it provides greater precision.*

*With this process, it is thus possible to produce a specific spectrum of parts which, similar to cold extruded parts, primarily includes rotationally symmetric components made of high alloy materials that either cannot be cold forged at all or only to a limited extent.*

*In addition, there are components which have traditionally been cold extruded and which required intermediate annealing that can be produced in a more cost-efficient manner by warm forging. To achieve this, however, the dimensional tolerance range needs to be extended.*

*The tools used are subjected to considerably greater mechanical stresses than those employed during hot forging. Fig. 6.1 shows that the yield point during warm forging is still about two to three times higher than at the usual hot forging temperature. That means that the tool designs need to be similar to those used for cold forging. They must be prestressed, for example, and split at fillets and sites susceptible to fracture.*

*In order to be able to carry out warm forging processes, certain measures need to be adopted with respect to lubrication. The most effective technique is to lubricate both the tool and the workpiece.*

Die Werkzeuge werden, je nach Schwierigkeit des Umformprozesses, mit grafitfreien oder grafithaltigen Öl- oder Wassersuspensionen besprüht. Das Öl oder die Wassersuspension trocknet auf den heißen Werkzeugen rasch ab. Der verbleibende Feststofffilm dient dann als Trenn- und Gleitschicht zwischen Werkstück und Werkzeug und reduziert dadurch den Werkzeugverschleiß und die Reibung. Zudem bewirkt ein flüssiges Umlauf-Schmiermittel eine Kühlung der Werkzeuge und muss deshalb in genügender Menge zugeführt werden. Das bedeutet, dass die Werkzeugtechnik sowohl die Zufuhr als auch den Abfluss dieser Schmiermittel berücksichtigen muss. Daneben werden üblicherweise auch die Abschnitte grafitiert, um einen zusätzlichen Oxidationsschutz während der Erwärmung zu gewährleisten und zur Reibungsminderung beizutragen.

Eine Wärmebehandlung vor der Umformung, wie sie beim Kaltfließpressen üblich ist, benötigen halbwarm umzuformende Werkstoffe nicht.

Ob eine Schlusswärmebehandlung stattfinden muss, ist von der Anwendung sowie vom Werkstoff des Bauteils abhängig. Soll das Umformteil auch ohne Schlusswärmebehandlung eine definierte Endfestigkeit bzw. ein definiertes Gefüge erhalten, so müssen Werkstoff, Umformtemperatur und Abkühlgeschwindigkeit genau aufeinander abgestimmt sein.

*Depending on the difficulty of the metal forging process, the tools are sprayed with oil or water suspensions that are either graphite-free or that contain graphite. The oil or water suspension quickly dries on the hot tools. The remaining solid film serves as a separating and sliding layer between the workpiece and tool, thereby reducing tool wear and friction. In addition, liquid circulating lubrication also has a cooling effect on the tools and must thus be supplied in sufficient quantities. When designing the tools, it is therefore necessary to incorporate means of supplying and draining these lubricants. In addition to tool lubrication, the billets are often also pre-coated in graphite in order to provide an additional protection against oxidation during the heating process and to reduce friction.*

*Unlike in cold extrusion, heat treatment prior to the forging operation is not necessary for warm forged materials.*

*Whether or not final heat treatment needs to be carried out depends on the material of the component and on the area of application. If the forged part needs to achieve a defined final strength or a specific grain structure without a finishing heat treatment, it is crucial that the material, the forging temperature and the cooling rate are all precisely coordinated.*

## 6.2 Maschinen und Umfeld

### *Machines and Peripheral Equipment*

Zur Fertigung von Halbwarmpressteilen werden überwiegend mechanische Mehrstufenpressen eingesetzt. Da die Fließspannung im Prozesstemperaturbereich stark abfällt, sollte mit einer engen Temperaturtoleranz gearbeitet werden, um eine konstante Fließspannung und damit enge Pressteiltoleranzen zu gewährleisten. Es empfiehlt sich daher, den Prozess der Halbwarmumformung zu automatisieren.

*Multi-stage presses are generally used for producing warm forged parts. As the yield stress decreases considerably within the process temperature range, it is common practice to work to a tight temperature tolerance. This guarantees a constant flow stress and thus tight workpiece tolerances. For these reasons, it is worthwhile automating the warm forging process.*

Die Automation im Pressenraum wird vorwiegend durch Hubbalkensysteme verwirklicht. Zur Erwärmung kommen heute nahezu ausschließlich induktive Systeme zum Einsatz. Diese sorgen für kurze Erwärmungszeiten, was die Zunderbildung minimiert. Dabei werden die Abschnitte durch Induktion auf ca. 150 ° vorerwärmt, anschließend mit Grafit beschichtet und dann auf die Umformtemperatur erwärmt.

*Automation is achieved within the tool space mainly by means of walking beam systems. For heating purposes, inductive systems are almost always employed. These provide short heating periods, thereby minimizing scale formation. Often, the billets are preheated to approx. 150 ° by induction, coated in graphite and then heated to forging temperature.*

Die Herstellung der Abschnitte selbst erfolgt durch Scheren oder Sägen. Aufgrund der Tatsache, dass sehr oft im geschlossenen Werkzeug gearbeitet wird, müssen enge Gewichtstoleranzen bei den Abschnitten eingehalten werden.

*The billets themselves are produced by shearing or sawing. Due to the fact that the warm forging process is very often carried out in closed tools, the billets must be kept to tight weight tolerances.*

Um ein gleichmäßiges Gefüge der Werkstücke zu erreichen, ist eine Vereinzelung der Teile auf dem Abkühlband nach der Umformung empfehlenswert.

*Workpieces with homogeneous grain structures can be achieved by ensuring that the forged parts do not come into contact with each other on the cooling belt.*

Des Weiteren gibt es auch Anwendungen mit Draht als Ausgangsmaterial, bei denen auf kleinen liegenden Mehrstufenpressen umgeformt wird.

*At the other end of the spectrum, there are applications using wire as the starting material. In that case, the forging operation is carried out on small horizontal multi-stage presses.*

Schließlich werden auch Taumelpressen zur Halbwarmumformung von Radnaben und anderen Bauteilen eingesetzt.

*Aside from these variants, there are also orbital presses used for the warm forging of wheel hubs and other components.*

### 6.3 Formgebung und Toleranzen *Shaping and Tolerances*

Wie in der Kaltumformung werden mit dem Verfahren der Halbwarmumformung bevorzugt rotations-symmetrische Teile gefertigt. In Einzelfällen können auch, vorwiegend durch das Querfließpressverfahren, Nebenformelemente mit erzeugt werden.

*As in the case of cold forging, it is primarily rotationally symmetric parts that are produced by warm forging processes. In some cases, it is also possible to produce secondary shape elements, usually by means of lateral extrusion processes.*

Die Formenvielfalt des Gesenkschmiedens wird allerdings nicht erreicht. Die Größe der Halbwarmpressteile wird nur durch die Größen der eingesetzten Pressen begrenzt. Bauteile haben typischerweise ein Gewicht von 0,1 kg bis 5 kg.

*The diversity of shapes possible with closed-die hot forging cannot be achieved, however. The size of warm forged parts is limited only by the size of the presses used. Components typically have a weight of between 0.1 kg and 5 kg.*

Die üblichen Bearbeitungszugaben bei Halbwarmpressteilen liegen bei 0,5 mm bis 1 mm pro Seite.

*The machining allowances for warm forged parts normally lie between 0.5 mm to 1 mm per side.*

Durch Kombination von Halbwarmumformung und Kaltumformung können auch Funktionsflächen hergestellt werden, die an bestimmten Flächen entweder keine Bearbeitungszugabe (Net-Shape-Teile) oder maximal eine Schleifzugabe von 0,2 mm bis 0,3 mm (Near-Net-Shape-Teile) aufweisen. Dazu müssen aber, wie beim Kaltumformen, Ausgleichsbereiche für die Massentoleranz geschaffen werden.

*By combining warm and cold forging, functional surfaces can also be produced which display either no machining allowance on certain surfaces (net-shape parts) or, at most, a grinding allowance of between 0.2 mm and 0.3 mm (near-net-shape parts). Just as with cold forging, however, it is necessary to create an area to accommodate the volume variation of the incoming billets.*

Der erreichbare Toleranzbereich liegt im Allgemeinen bei IT 10 bis IT 12 und damit zwischen den üblichen Toleranzen der Kaltumformung und des Gesenkschmiedens. Derartig enge Toleranzen sind aber, ähnlich wie in der Kaltumformung, nur für werkzeuggebundene Maße zu erreichen. Für Gesamtlängen gelten größere Toleranzen, ebenso für die erwähnten Materialüberläufe.

*The tolerance range that can be achieved generally lies at between IT 10 to IT 12 and thus between the tolerances typical of cold forging and those of closed-die hot forging. Similar to cold forging, it is only possible to achieve such tight tolerances on those surfaces that come into contact with the tool. Larger tolerances are needed for overall lengths, as well as for excess material.*

Zu beachten sind weiterhin eventuelle Rundlaufabweichungen aufgrund eines gewissen Versatzes von Ober- und Unterwerkzeug. Es ist daher unumgänglich, die Erstaufspannung auch bei Halbwarmpressteilen exakt festzulegen. Sie ist entscheidend für die Qualität und Effizienz der spanenden Weiterverarbeitung.

Die Oberflächengüte von Halbwarmpressteilen liegt ebenfalls zwischen der von Kalt- und Warmpressteilen. Rauheitswerte von  $R_z = 18 \mu\text{m}$  bis  $R_z = 60 \mu\text{m}$  sind nach der Umformung üblich, da die Bauteile nach der Halbwarmumformung gestrahlt werden müssen. Dabei wird die Schmiermittelschicht und die leichte Verzunderung entfernt.

*Possible radial runout errors due to offset between the upper and lower tools also needs to be taken into account. It is therefore imperative, even with warm forged parts, to precisely establish the first clamping operation of the subsequent machining process. The quality and efficiency of the machining processes depend on this.*

*The surface finish of warm forged parts likewise lies between that of cold and hot forged parts. Roughness values of between  $R_z = 18 \mu\text{m}$  to  $R_z = 60 \mu\text{m}$  following forging are typical, as the components need to be shot blasted following warm forging. During shot blasting, the lubricant layer and the slight scaling are removed.*

## 6.4 Teilespektrum *Spectrum of Parts*

Die Bauteile in Abb. 6.2 zeigen typische Merkmale für rotationssymmetrische Werkstücke, die traditionell dem Formspektrum des Kaltfließpressens zuzuordnen sind. Aufgrund der Werkstoffart oder auch aus wirtschaftlichen Erwägungen werden diese Teile jedoch inzwischen halbwarm umgeformt.

In allen Fällen sind die Querschnittunterschiede zwischen Schaft und Flansch bzw. Formelement so groß, dass eine Mehrstufenfertigung durch Kaltfließpressen ohne Zwischenrekristallisationsglühung nicht möglich wäre oder die Bauteilgröße in der Kaltumformung eine zu hohe Presskraft erfordern würde.

*The components shown in Fig. 6.2 display the typical properties of rotationally symmetric workpieces which, in the past, have always been categorized as a product of cold extrusion processes. Due to the type of material and to economic considerations, these parts are now produced by warm forging.*

*In all cases, the differences in cross section between shaft and flange are, however, so great that multi-stage production by cold extrusion would not be possible without intermediate recrystallization annealing, or the component size would demand excessive pressing forces during cold forging.*

Auch der üblicherweise für die Zapfen (siehe Abb. 6.2, Mitte unten) verwendete Werkstoff, ein Vergütungsstahl, würde ein Kaltfließpressen erschweren. Durch Halbwarmumformung bei ca. 800 ° lassen sich diese Teile in einem mehrstufigen Prozess in nur einem Pressendurchlauf fertigen. Dabei wird in dem gezeigten Beispiel die Innenkontur einbaufertig gepresst.

*Even the heat treatable steel normally used for the rear axle spindles (see Fig. 6.2, lower center) would render a possible cold extrusion operation difficult. By means of warm forging at approx. 800 °, these parts can be produced in a multi-stage operation in just one press run. During this process, the inner contour of the example shown is forged so that it is ready-for-assembly.*



Abb./Fig. 6.2: Halbwarm umgeformte Bauteile  
*Parts produced by warm forging*

Abb. 6.2 (rechts unten) zeigt ein Schmiederohrteil eines Injektorkörpers, der in der Dieseleinspritzung eingesetzt wird. Dieser Injektor muss aufgrund des permanenten Druckauf- und -abbaus eine hohe Dauerwechselfestigkeit besitzen.

*Fig. 6.2 (lower right) shows a forging of an injector body used in diesel injection systems. This injector needs to have a high fatigue limit due to the permanent build-up and decrease of pressure.*

Durch Querfließpressen können bei der geforderten Stahlqualität des C45 ein idealer Faserverlauf und dadurch beste mechanische Eigenschaften eingestellt werden.

*Lateral extrusion allows the required C45 steel to attain an ideal fiber flow and thus optimum mechanical properties.*

Ein Kaltfließpressen dieses Werkstücks ist aufgrund der Stahlqualität mit recht hohem Kohlenstoffgehalt und aufgrund der ausspringenden Formelemente nicht möglich.

*Cold forging this workpiece is not possible because of the steel grade with its comparatively high carbon content and the protruding shaped elements.*

Gesenkschmieden wiederum würde wesentlich größere Bearbeitungsaufmaße ergeben sowie eine liegende Fertigung mit Grat und damit eine deutlich schlechtere Werkstoffausnutzung erzielen.

*Hot forging, in turn, would give rise to greater machining allowances and would involve horizontal production with flash and thus considerably worse material utilization.*

Nach der Umformung, die bei circa 900 ° stattfindet, wird der Körper gehärtet und anschließend angelassen. Nach dem Anlassen liegt ein martensitisches Vergütungsgefüge vor.

*Following the forging process, which takes place at around 900 °, the body is hardened and then tempered. Following tempering, a martensitic quench and temper grain structure is present.*

Abb. 6.2 (links unten) zeigt eine Antriebswelle, die auf einer mechanischen Presse halbwarm umgeformt wird. Im Anschluss an die Umformung folgt eine kontrollierte Abkühlung. Der legierte Stahl weist danach ein FP-Gefüge (ferritisch-perlitisches Gefüge) mit gewissen Anteilen Zwischenstufengefüge (Bainit) auf, ist aber in diesem Zustand gut zerspanbar.

*Fig. 6.2 (lower left) shows an input shaft which is warm forged on a mechanical press before undergoing controlled cooling. Following this, the alloy steel demonstrates an FP grain structure (ferritic-pearlitic) with a certain proportion of bainite. This structure is ready for machining without further annealing.*

In der oberen Zeile der Abb. 6.2 befinden sich von links nach rechts ein Antriebskegelrad, ein Monoblockgelenkstück und ein Rohteil für einen Lamellenenträger.

*The upper row of Fig. 6.2 shows (from left to right) a pinion, a monoblock outer race and a disk carrier forging.*



# 7 Kaltumformung

## Cold Forging

### 7.1 Grundlagen

#### Fundamentals

Werden die Abschnitte für einen Umformvorgang nicht vorher erwärmt, sondern erfolgt die Umformung bei Raumtemperatur, so spricht man von Kaltumformung. Da keine Schwindung oder Verzerrung auftritt, sind Form- und Maßhaltigkeit kalt umgeformter Bauteile größer als bei vergleichbaren Schmiedestücken.

*Cold forging is a process in which the billets are not preheated, but are forged at room temperature. Due to the fact that shrinkage and scaling do not occur, cold forged components have greater shape and dimensional accuracy than comparable hot forged parts.*

Hauptmerkmal	Main Characteristics
Hauptsächlich rotationssymmetrische Formen	Mainly rotationally symmetric shapes
Sehr gut automatisierbar für mittlere und größere Stückzahlen	Easy to automate for medium to large production runs
Nicht alle Werkstoffe umformbar (C-Gehalt <0,5%, Gesamtlegierungsgehalt <5%)	Not all materials can be forged (carbon content <0.5%, total alloy content < 5%)
Hohe Maßgenauigkeit, somit engste Toleranzen/geringe Bearbeitungszugabe	High dimensional accuracy, and thus the tightest possible tolerances/low machining allowance
Festigkeitssteigernder Faserverlauf	Strength-enhancing fiber flow
Gute Oberflächengüte	Good surface finish
Geringe Bearbeitungszugabe	Low machining allowance
Umformung bei Raumtemperatur	Forging at room temperature

Abb./Fig. 7.1: Hauptmerkmale der Kaltumformung  
*Main characteristics of cold forging*

Die Gestaltungsfreiheit der Pressteile beim Kaltumformen ist im Vergleich zum Warmumformen durch die begrenzte Formänderungsfähigkeit des Bauteilwerkstoffs und durch die hohe Fließspannung des Bauteils, welche zu hohen Werkzeugbelastungen führt, eingeschränkt (Abb. 7.1).

*The drawback of cold forging stems from the limited ductility of the workpiece material and from the high flow stresses that lead to significant tool loads, both of which restrict the design scope of cold forged parts compared to hot forging (Fig. 7.1).*

Zwingende Voraussetzung für das Kaltumformen von Stahl ist daher eine geeignete Werkstoffauswahl, eine spezielle Vorbehandlung der Bauteile, um das Gefüge und die Oberfläche für die nachfolgende Umformung zu optimieren sowie eine spezielle Werkzeugtechnologie.

Zum Kaltumformen eignen sich neben verschiedenen Nichteisenmetallen vornehmlich unlegierte und niedrig legierte Stähle, wobei der Kohlenstoffgehalt unter 0,5 % und der Gehalt der weiteren Legierungsbestandteile unter 5 % liegen sollten. Weitere Begleitelemente wie Schwefel oder Phosphor sollten nur in geringen Mengen im Werkstoff enthalten sein (max. 0,035 %). Die Formänderungsfähigkeit wird dann vor der Umformung durch Glühen auf kugligen Zementit (sogenanntes AC-Glühen) oder eine FP-Glühung eingestellt.

Ist bei der Umformung eines Werkstücks das Formänderungsvermögen dennoch erschöpft, kann durch eine Zwischenwärmebehandlung das Gefüge rekristallisiert und das Werkstück danach weiter umgeformt werden.

Kann in der fertigen Komponente die Kaltverfestigung ausgenutzt werden, lassen sich höherwertige Stahlqualitäten ersetzen. Da viele Werkstücke nach einer abschließenden Zerspanung aber nochmals wärmebehandelt (z. B. Einsatzhärten) werden, geht dieser Vorteil häufig wieder verloren.

*When cold forging steel, it is absolutely imperative, therefore, that a suitable material is selected, that the billets undergo a special pretreatment in order to optimize the grain structure and surface for the subsequent forging operation, as well as that special tool technologies are used.*

*Aside from various non-ferrous metals, carbon and low alloy steels are also particularly suitable for cold forging operations, as long as the carbon content amounts to less than 0.5% and the share of other alloying elements does not exceed 5%. The percentage of other impurities, such as sulfur and phosphorus should only be present in negligible amounts (max. 0.035 %). The formability can be optimized prior to the forging operation by spheroidizing (AC) or by ferritic-pearlitic annealing (FP).*

*If the formability of the workpiece is nevertheless exhausted during the forging process, the grain structure can be recrystallized during an intermediate heat treatment operation, after which forging can be resumed.*

*By taking advantage of strain hardening, higher quality steel grades are not needed to produce high-strength workpieces. However, the fact that most workpieces undergo a further heat treatment process (e. g. case hardening) after final machining means that the benefit of strain hardening often cannot be exploited after all.*

Durch Kaltumformung hergestellte Pressteile weisen eine hohe Maß- und Formgenauigkeit auf. Dadurch können die Bearbeitungsaufmaße sehr gering gehalten werden. In speziellen Fällen lassen sich komplexe Funktionsflächen, wie z. B. Verzahnungen oder Kugellaufbahnen bei Gleichlaufgelenken, einbaufertig herstellen.

*Workpieces produced by cold forging demonstrate a high degree of dimensional and shape accuracy. The machining allowances can therefore be kept very low. In some cases, it is possible to produce complex, ready-for-assembly functional surfaces, such as splines or ball tracks for constant velocity joints.*

Wie auch bei den geschmiedeten Bauteilen ist bei kaltumgeformten Pressteilen der Faserverlauf günstiger als bei zerspanend hergestellten Teilen. Im Gegensatz zur Kaltverfestigung bleibt der Faserverlauf nach Wärmebehandlungsvorgängen erhalten. Die Steigerung der Dauerwechselfestigkeit kann bei gleichem Werkstoff durch einen optimierten Faserverlauf bis zu einem Drittel betragen.

*As with die-forged parts, the fiber flow of cold forged components is more favorable than that of machined parts. In contrast to strain hardening, the fiber flow remains intact following heat treatment processes. The fatigue strength may increase by up to a third with optimized fiber flow in the same material.*

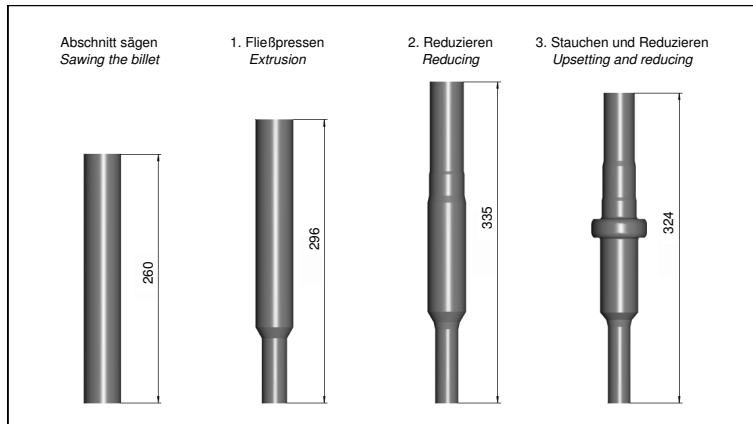


Abb./Fig. 7.2: Fertigungsfolge einer kaltfließgepressten Getriebewelle  
*Forging sequence of a cold forged transmission shaft*

Seltener werden Bauteile mit Nebenformelementen durch Kaltumformung hergestellt, wenn, dann oftmals durch einen Querfließpressvorgang.

*Parts with secondary shapes are not commonly produced by means of cold forging, but if they are, then a lateral extrusion process is often used.*

Da die Endgeometrie meist nicht in einer einzigen Umformstufe erzielt werden kann, werden die Verfahren der Kaltmassivumformung mehrstufig ausgeführt. Abb. 7.2 zeigt beispielhaft die Fertigungsfolge einer kaltfließgepressten Getriebewelle, die durch Vollvorwärtsfließpressen, freies Reduzieren und Stauchen hergestellt wird.

*As the final geometry often cannot be achieved in a single forging operation, cold forging processes are normally carried out in successive forging stages. Fig. 7.2 shows, for example, the production sequence of a cold forged transmission shaft, involving forward rod extrusion, free reduction and upsetting.*

## 7.2 Maschinen und Umfeld *Machines and Peripheral Equipment*

Die hohen Fließspannungen und die mit dem Umformgrad zunehmende Werkstoffverfestigung erfordern sehr hohe spezifische Presskräfte und stellen höchste Anforderungen an die eingesetzten Umformwerkzeuge und die verwendeten Umformanlagen.

*The high flow stresses and the strain hardening that increases with the plastic strain render very high specific pressing forces necessary and place great demands on the forging tools and equipment used.*

Als Ausgangsmaterial werden für die Kaltumformung Stangenabschnitte oder Draht verwendet. Damit lassen sich Teile fertigen, deren Gewicht von wenigen Gramm bis etwa 30 kg reicht. Die dazu eingesetzten Pressen sind in Abb. 7.3 aufgeführt. Sie kommen in stehender oder liegender Form zum Einsatz und werden abhängig von den zu pressenden Stückzahlen manuell oder voll automatisiert betrieben.

*Bar billets or wire is used as the starting material in cold forging. These allow parts to be produced with a weight that can range from a few grams right up to around 30 kg. The presses used in this process are outlined in Fig. 7.3. They are available in an upright or in horizontal form and can be operated either manually or completely automatically, depending on the production volume.*

Abb. 7.4 zeigt eine vierstufige automatisierte Hydraulikpresse mit einem Greifersystem für den Transport der Teile. Alternativ kann der Teiletransport aber auch durch ein Hubbalkensystem bzw. durch Roboter erfolgen, bei kleineren Stückzahlen auch manuell.

*Fig. 7.4 shows a four-stage automated hydraulic press with a gripper system for transferring the parts from stage to stage. This transport can also occur via a walking beam system or via robots. In the case of small production runs, the parts can just as well be transferred manually.*

Maschinentyp		Machine Type	
Eigenschaften	Teilespektrum	Characteristics	Spectrum of Parts
Hydraulische Pressen		Hydraulic presses	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Langsamere Umformgeschwindigkeit</li> <li>• Geeignet für Klein-, Mittel- und Großserien</li> <li>• Längere Taktzeit</li> <li>• Kraft über gesamten Umformweg</li> <li>• Große Arbeitshöhe möglich</li> <li>• Leichtere Automatisierbarkeit</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lange Getriebewellen</li> <li>• Antriebskegelräder</li> <li>• Hohlteile</li> <li>• Bauteile mit Verzahnungen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Slower forging speed</i></li> <li>• <i>Suitable for small, medium and large production runs</i></li> <li>• <i>Longer cycle times</i></li> <li>• <i>Force across the entire tool travel</i></li> <li>• <i>Large strokes possible</i></li> <li>• <i>Easier to automate</i></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Long transmission shafts</li> <li>• Pinions</li> <li>• Hollow parts</li> <li>• Components with splines</li> </ul>
Mechanische Pressen (Kurbelpressen, Kniehebelpressen, Gelenkpressen)		Mechanical presses (Crank presses, toggle presses, knuckle joint presses)	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Großserie</li> <li>• Kürzere Taktzeiten</li> <li>• Kurzhubige Teile</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Achszapfen</li> <li>• Getriebewellen</li> <li>• Antriebswellen</li> <li>• Hohlteile</li> <li>• Prägeteile</li> <li>• Antriebskegelräder</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Large production runs</li> <li>• Shorter cycle times</li> <li>• Short-stroke parts</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Stub axles</li> <li>• Transmission shafts</li> <li>• Drive shafts</li> <li>• Hollow parts</li> <li>• Coining (calibrated) parts</li> <li>• Pinions</li> </ul>

Abb./Fig. 7.3: Maschinen für Kaltmassivumformung  
*Cold forging machines*

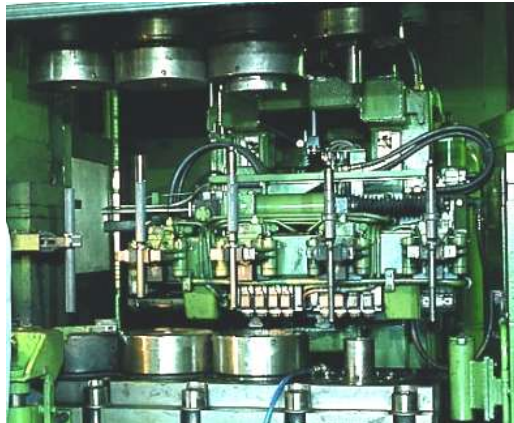


Abb./Fig. 7.4: Automatisierte vierstufige Hydraulikpresse mit 1.000 mm Hub  
*Automated four-stage hydraulic press with 1,000 mm stroke*

Die beim Pressen entstehenden hohen Kontaktspannungen zwischen Werkzeug und Werkstück können zu einem frühzeitigen Verschleiß oder sogar zu einem Bruch der Werkzeuge führen.

*The contact stresses arising between the tool and the workpiece during the forging operation can sometimes lead to premature wear or even to tool failure.*

Um den Verschleiß zu minimieren, werden sehr harte Werkstoffe bis hin zu Hartmetallen und Keramiken als Matrizeneinsätze verwendet.

*In order to minimize wear, very hard tool steels or even carbides and ceramics are used as die inserts.*

Da diese spröden Werkstoffe aber unter Zugspannungen besonders bruchempfindlich sind, müssen sie durch entsprechende Armierungen vorgespannt werden, um die Zugspannungen zu minimieren.

*As these brittle materials are particularly susceptible to fracture when subjected to tensile stresses, they need to be prestressed with appropriate shrinkage rings in order to minimize such effects.*

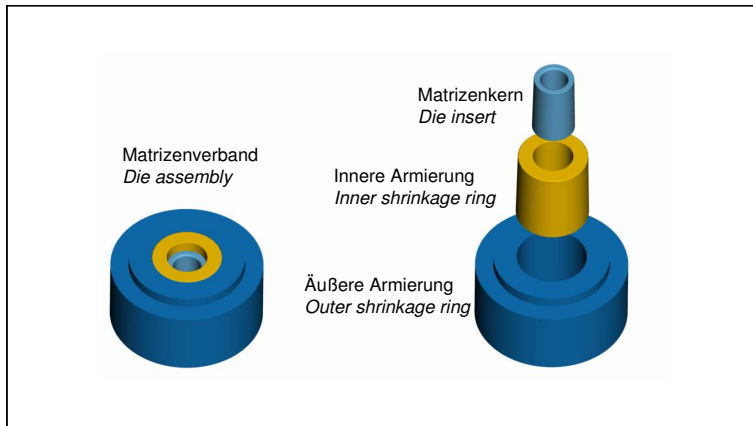


Abb./Fig. 7.5: Matrizenverband eines Kaltumformwerkzeugs  
*Die assembly of a cold forging tool*

Zum Vorspannen werden die Matrizeneinsätze entweder kalt in einen Armierungsring eingepresst oder thermisch eingeschrumpft. In Abb. 7.5 ist der Armierungsverband eines Umformwerkzeugs zum Formen eines Getriebewellenbunds dargestellt. Er besteht aus äußerer Armierung, innerer Armierung und Matrizenkern.

*This prestressing is achieved either by pressing the die inserts in the cold state into a shrinkage ring, or shrink-fitting them under application of heat. Fig. 7.5 shows the shrinkage ring set of a forging tool for producing a flange on a transmission shaft. It consists of an outer and an inner shrinkage ring, as well as the die insert.*

Neben der Armierungstechnik kann einem Bruch der Werkzeuge durch Teilung der Matrizeninserte an Hohlkehlen oder an bruchgefährdeten Stellen entgegengewirkt werden.

*Aside from the use of shrinkage rings, splitting the die inserts at fillets or at sites that are particularly sensitive to fracture can also prevent tool failure.*

Neben einer speziellen Werkzeugtechnologie erfordern die hohen Druckspannungen auch besondere Maßnahmen, um eine Kaltverschweißung zwischen Werkzeug und Werkstück zu verhindern. Dies erfolgt durch das Aufbringen einer Träger- und Trockenschmierstoffschicht auf die Werkstücke, die für eine ausreichende Trennung von Werkstück und Werkzeug sorgt.

*The great forging pressure involved not only demands a special die technology, but also the implementation of measures to prevent adhesion between tool and workpiece. A base coating and a dry lubricant are thus applied to the workpieces in order to sufficiently separate the tool and workpiece.*

Als Trenn- und Trägerschicht wird eine Zink-Phosphat-Schicht aufgebracht. Als druckbeständige feste Gleitmittel werden Grafit, Molybdändisulfid, spezielle Seifen oder Wachse eingesetzt.

*In order to improve lubricant adhesion, the billets are usually covered with a zinc-phosphate coating. The most commonly used pressure-resistant solid lubricants are graphite, molybdenum disulfide, special soaps or wax.*

Der Bereich zwischen Tischauflage und Stößelplatte einer Presse wird als Werkzeugeinbauraum bezeichnet, in dem ein- oder mehrstufige Umformwerkzeuge in einen Werkzeughalter eingebaut werden. Massive Auswerfersysteme und hohe Auswerferkräfte sind zum Entformen der verschiedenen Umformstufen erforderlich. Bei ausreichender Stückzahl wird der Vorgang automatisiert durchgeführt.

*The area between the press bed and ram is the tool space, and it is here that single- or multi-stage forging tools are integrated into a tool block. Strong ejector systems and great ejecting forces are necessary for removing the part from the various forging stages. If the production run is sufficiently large, this process can be fully automated.*

Abb. 7.6 zeigt den kompletten Einbau eines dreistufigen Kaltumformwerkzeugs. Die verschiedenen Werkzeugeinzelteile sind farblich gekennzeichnet.

*Fig. 7.6 shows the complete assembly of a three-stage cold forging tool. The various tool parts are indicated by different colors.*

Aufgrund der notwendigen Vorbehandlung der Bauteile durch Glühen und Beschichten ist der Prozess der Kaltumformung sehr aufwendig.

*The necessary pretreatment of the billets by means of annealing and coating involves considerable effort in the whole cold forging process sequence.*

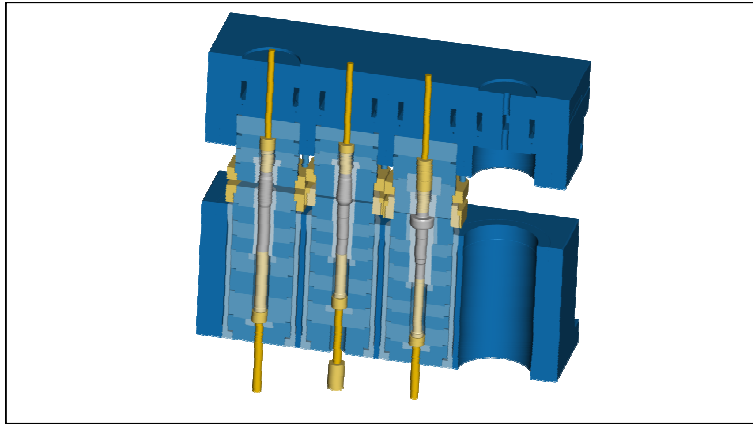


Abb./Fig. 7.6: Dreistufiges Umformwerkzeug zur Herstellung von Getriebewellen  
*Three-stage cold forging tool assembly for the production of transmission shafts*

Zunächst wird das Rohmaterial geschert, gegläht und beschichtet, bevor es umgeformt wird. Erreicht die Umformung werkstoff- und prozessspezifische Grenzen, muss ein Rekristallisationsglühen durchgeführt werden. Danach muss erneut vorbeschichtet werden. Abschließend kann, je nach Kundenwunsch, eine Schlusswärmebehandlung erfolgen, bevor das Bauteil in der Endkontrolle geprüft und zum Versand vorbereitet wird.

*The raw material is first sheared, annealed and coated before being forged. If material and process-specific limits are reached during the forging operation, recrystallization annealing must be carried out and coating repeated. Finally, depending on the customer requirements, the part might undergo a final heat treatment before being checked in a final inspection process and prepared for shipping.*

Im Gegensatz hierzu erfolgt die Herstellung von Schrauben und anderen Verbindungselementen oft auf der Basis von geglähtem, teilweise auch vergütetem, gebondertem und vorgezogenem Draht, der direkt im Hauptaggregat abgeschert und in mehreren Stufen umgeformt wird.

*As a point of contrast, screws and other joining elements are produced using annealed, sometimes quenched and tempered, bonderized and drawn wire, which is sheared and forged in several stages directly in the cold forging machine.*



## 7.3 Formgebung und Toleranzen

### *Shaping and Tolerances*

Mit den Verfahren der Kaltumformung lassen sich überwiegend rotationssymmetrische Bauteile herstellen. Seltener werden Nebenformelemente durch Querfließpressen gefertigt.

*Cold forging processes are primarily used to produce rotationally symmetric components. Less frequently, secondary shape elements are produced by lateral extrusion.*

Zunehmend werden Bauteile hohlumgeformt, um dem Leichtbau und der daraus resultierenden Reduzierung von Kohlendioxidemissionen in der Fahrzeugverwendung Rechnung zu tragen.

*Increasingly, parts are being hollow forged in order to meet demands for lightweight design and for the resulting reduction in carbon dioxide emissions in the vehicle applications.*

In Kombination mit anderen Verfahren der Massivumformung können mit dem zur Kaltumformtechnik zählenden Kalibrierverfahren beispielsweise Verzahnungen oder Kugellaufbahnen mit sehr geringem Schleifaufmaß oder sogar einbaufertig hergestellt werden.

*By combining other forging processes with the calibration processes that belong to cold forging technology, it is possible to produce splines or ball tracks, for example, with a very low grinding allowance or even as ready-for-assembly parts.*

Durch die verfahrensbedingt auftretenden hohen Spannungen ist die Formenvielfalt gegenüber dem Warmumformen jedoch eingeschränkt.

*On the downside, the high stresses that occur as a result of this process lead to a much more limited diversity of forms than is the case with hot forging.*

Dafür lassen sich aber sehr enge Toleranzen erreichen. Bei kaltumgeformten Bauteilen ist in der Regel ein Bearbeitungsaufmaß von 0,2 mm bis 0,75 mm je Seite üblich. Es lassen sich aber auch Funktionsflächen ohne Aufmaß herstellen, wie dies bei den Tripodengelenken der Fall ist, die in Abb. 9.3 dargestellt sind.

*One advantage, however, is that very tight tolerances can be achieved. A machining allowance of between 0.2 mm and 0.75 mm per side is usual with cold forged components. It is also possible, though, to produce functional surfaces without allowance, as in the case of the tripod universal joints shown in Fig. 9.3.*

Werden dermaßen enge Toleranzen vereinbart, sind auch Bereiche am Bauteil vorzusehen, welche die Massetoleranz aufnehmen können. Dabei kann es sich um freie Materialüberläufe oder entsprechende Dickentoleranzen an weniger wichtigen Flächen handeln. Dies gilt insbesondere, wenn mit geschlossenen Werkzeugen gearbeitet wird.

*If such tight tolerances are agreed upon, it is necessary to determine areas of the component which can absorb excess material volume. In practice, this means having non-specified shapes on the workpiece or appropriate thickness tolerances on less important surfaces. This is particularly the case when using closed tools.*

Die erreichbaren Toleranzklassen beim Kaltumformen liegen im Allgemeinen zwischen IT 7 und IT 11. Diese Maße sind aber immer werkzeuggebundene Maße. Ein Versatz zwischen Ober- und Unterwerkzeug kann ebenso zu Rundlaufabweichungen oberhalb der genannten Toleranzklassen führen, wie ein Massenausgleich in der Länge die Toleranzklasse erweitert.

*The tolerance classes that can normally be achieved with cold forging generally lie in the range of IT 7 and IT 11. These dimensions always depend on tool accuracy, however. An offset between the upper and lower dies can also lead to radial runouts above the given tolerance classes, just as mass compensation in length increases the tolerances.*

Da beim Kaltumformen keine Verzunderung der Werkstücke eintritt, können Oberflächengüten von  $R_z = 5 \mu\text{m}$  bis  $R_z = 20 \mu\text{m}$  erreicht werden.

*As no scaling occurs on the workpiece during cold forging, surface finishes of  $R_z = 5 \mu\text{m}$  to  $R_z = 20 \mu\text{m}$  can be achieved.*

## 7.4 Teilespektrum *Spectrum of Parts*

Aufgrund der Charakteristik des Kaltumformprozesses eignet er sich für verschiedenste Kategorien von Bauteilen.

*The characteristics of the cold forging process render it suitable for a highly diverse range of component categories.*

### 7.4.1 Getriebewellen und Antriebskegelräder *Transmission Shafts and Pinions*

Ausgehend von einem gescherten bzw. gesägten Abschnitt werden Antriebskegelräder sowie Getriebewellen mehrstufig umgeformt.

*Starting with a sheared or sawed billet, bevel drive gears and transmission shafts are usually forged in several stages.*

Das Spektrum umfasst Wellen mit unterschiedlichen Kopfformen, verschieden abgestuften Schäften und Wellen mit Hinterschnitten, die durch zwei Pressbünde gebildet werden (siehe Abb. 7.7). Ein Anformen von Funktionsflächen, Verzahnungen oder gepressten Zentren ist ebenfalls möglich.

*The spectrum of parts encompasses shafts with different head forms, as well as shafts with different diameters and with undercuts that are formed by two flanges (see Fig. 7.7). Functional surfaces, splines or pressed centers may also be incorporated.*



Abb./Fig. 7.7: Kaltfließgepresste Getriebewellen  
*Cold forged transmission shafts*

Der zweite Pressbund bei den Hinterschnittwellen wird in einem speziellen, radial schließenden Werkzeug in der letzten Umformstufe gepresst.

*The second flange in the shafts with undercut is pressed in a special tool that closes radially during the final forging stage.*

Die stehende Prozessführung ermöglicht dabei eine gratlose Fertigung mit engsten Rundlauf toleranzen und belastungsgerechtem Faserverlauf.

*This vertical process enables flashless parts to be produced with the tightest possible runout tolerances and a fiber flow that can withstand stresses in an optimum way.*

Kostenreduzierend ist es, wenn verschiedenartige Zentren in die Wellenenden mit angepresst werden, da Abläng- und Zentrierbearbeitungsvorgänge entfallen können. Die Zentren können je nach Bauteilcharakteristik auch beidseitig eingebracht werden.

*Cost savings can be achieved by pressing various insert centers into the shaft ends, as this renders cutting to length and centering operations superfluous. Depending on the component characteristics, these centers can be produced on both sides.*

#### 7.4.2 Hohlteile *Hollow Components*

Auch Hohlteile lassen sich vorteilhaft durch Kaltmassivumformung herstellen.

*Even hollow components can be produced efficiently in cold forging.*

In Abb. 7.8 sind sechs unterschiedliche wellenförmige Hohlteile dargestellt.

*Fig. 7.8 shows six different shaft-like hollow parts.*



Abb./Fig. 7.8: Durch Kaltumformung hergestellte Hohlteile  
*Hollow parts produced by cold forging*

Durch den sehr hohen Umformgrad ist innerhalb der Umformfolge evtl. ein Rekristallisationsglühen notwendig. Die zweiteilig-gefügte Welle (siehe Abb. 7.8, Mitte unten) wird in zwei Hälften durch Napfrückwärtsfließpressen und Reduzieren hergestellt. Anschließend werden die beiden Hälften durch Reibschweißen (siehe Kapitel 8.7) gefügt.

*Due to the very high plastic strain, recrystallization annealing may be necessary within the forging process. The shaft shown in Fig. 7.8 (lower center) is produced in two halves by backward cup extrusion and reducing. As a final step, friction welding then joins the two halves (see Chapter 8.7).*

Die abgebildete Hohlwelle (siehe Abb. 7.8, rechts oben) wird ausgehend von einem Hohlstück durch mehrfaches Hohlvorwärtsfließpressen und Kopfstauen umgeformt.

*The hollow shaft (see Fig. 7.8, upper right) is formed when a tube billet undergoes multiple forward tube extrusion and heading operations.*

Die hohle Bundwelle in Abb. 7.8 (links oben) findet Verwendung als Antriebswelle in einem Doppelkupplungsgetriebe. Das Hohlvolumen entspricht 1,9 kg Stahl.

*The hollow flange in Fig. 7.8 (upper left) is used as a drive shaft in a double-clutch transmission. The hollow volume corresponds to 1.9 kg of steel.*

Das durchgängig hohle Antriebskegelrad in Abb. 7.8 (Mitte oben) hat eine gleichbleibende Wandstärke im Schaft. Diese Innenkontur, insbesondere bei dem hohlen Kegelkopf, wäre zerspanend nur bedingt herstellbar. Zudem ist am Schaftende ein Innensechskant eingepresst.

*The completely hollow pinion in Fig. 7.8 (upper center) has a constant wall thickness along the shaft. This inner contour, and particularly the hollow pinion head, would be highly difficult to produce by machining. In addition, an internal hexagon is pressed in at the shaft end.*

Bei der aufgeschnittenen Welle in Abb. 7.8 (links unten) handelt es sich um ein Antriebskegelrad, bei dem das Hohlvolumen circa 1,4 kg Stahl entspricht.

*The shaft shown in cross section in Fig. 7.8 (lower left) is a pinion with a hollow volume corresponding to approximately 1.4 kg of steel.*

Die in Abb. 7.8 (rechts unten) gezeigte Hohlwelle wird durch Napfen, Hohlvorwärtsfließpressen und anschließendes Fertigpressen kaltumgeformt.

*The hollow shaft shown in Fig. 7.8 (lower right) is produced by a cold forging process that involves backward extrusion, forward tube extrusion and subsequent finish extrusion.*



Abb./Fig. 7.9: Komponenten mit kaltumgeformter einbaufertiger Verzahnung  
*Components with ready-for-assembly gear teeth or splines produced by cold forging*

### 7.4.3 Gepresste Verzahnungen *Forged Gears and Splines*

Abb. 7.9 zeigt mehrere Bauteile mit einbaufertig gepressten Außen- und Innenverzahnungen. Sowohl Steck- als auch Lamellenverzahnungen sind umformtechnisch herstellbar, je nach Toleranzanforderung. Die in Abb. 7.9 dargestellten Verzahnungen werden durch Fließpressen hergestellt.

Bei der Getriebewelle in Abb. 7.9 (rechts unten) wird das kaltumgeformte Schmiedeteil zerspant und anschließend die Verzahnung im Sackloch fließgepresst. Bei dem Antriebsflansch (links unten) wird die größere Verzahnung genapft. Die Verzahnung mit dem kleineren Durchmesser wird geräumt.

*Fig. 7.9 shows several components with ready-for-assembly forged internal and external gears. Forging can be used to produce both gears and splines, depending on the tolerance requirements. The gears shown in Fig. 7.9 are produced by means of extrusion.*

*In the case of the transmission shaft shown in Fig. 7.9 (lower right), the cold forged part is machined before the splines are forged in a blind hole. The larger splines in the drive flange (lower left) are produced by backward extrusion. The splines with the smaller diameter are broached.*

Die Abtriebswelle in Abb. 7.9 (Mitte, oben und unten) wird nach der Umformung zerspannt, und die Lamellenverzahnung wird eingepresst. Durch die Zerspannung werden genaueste Toleranzen eingehalten. Bei der Schieberwelle (links oben) wird die Verzahnung ebenfalls mit Hilfe eines Verzahnungsstempels eingepresst. Dabei fließt das Material entgegengesetzt zur Bewegungsrichtung des Stempels.

*The output shaft in Fig. 7.9 (upper and lower center) is machined after forging, and the gears are produced by forging. The machining process ensures that the tightest of tolerances are observed. A spline punch is likewise used to press the gears on the slide shaft (upper left). This causes the material to flow in the opposite direction to the punch movement.*

Bei dem Lamellenträger in Abb. 7.9 (rechts oben) ist die Verzahnung am Schaft fließgepresst. Die Verzahnung am großen Durchmesser wurde wälzgefräst. Hier ist grundsätzlich auch eine umformende Fertigung denkbar.

*The splines on the shaft of the disk carrier in Fig. 7.9 (upper right) are extruded. The splines on the large diameter were produced by milling. In principle, production by means of forging is feasible here, too.*

Ein weiteres Bauteil mit einbaufertiger Verzahnung ist in Abb. 9.3 (rechts oben) dargestellt.

*Another part with ready-for-assembly splines is shown in Fig. 9.3 (upper right).*

# 8 Verfahren der Weiter- und Fertigbearbeitung

## *Machining and Finishing*

Umgeformte Bauteile können je nach Anforderungen insgesamt (z. B. Schrauben) oder an Teilflächen (z. B. kaltumgeformte Steckverzahnungen an einer Getriebewelle) einbaufertige Konturen besitzen. In vielen Fällen folgen deshalb der Umformung weitere, meist zerspanende Fertigungsverfahren. Oft werden auch die finalen Werkstoffeigenschaften noch durch eine Wärmebehandlung eingestellt.

*Depending on requirements, forged parts may be provided with contours that are ready-for-assembly across the entire component (e. g. threaded fasteners) or on some surfaces (e. g. cold forged splines on a transmission shaft). In many cases, forging is followed by additional, mainly cutting, production processes. Subsequent heat treatment is often then used to provide the final material properties.*

In diesem Kapitel sind auch einige umformende Verfahren eingeordnet (z. B. Kaltwalzen von Verzahnungen), da diese einen vorhergehenden Zerspanungsprozess erfordern. Aus diesem Grund werden sie in die Verfahren der Weiterbearbeitung eingeordnet.

*Some forging processes are included in this chapter (e. g. the cold rolling of gears), as these require a prior machining operation. For this reason, they will be included under the machining operations.*

### 8.1 Einteilung der zerspanenden Verfahren

#### *Classification of Cutting Processes*

Beim mechanischen Abtrennen von Spänen mittels einer Werkzeugschneide unterscheidet man zwischen geometrisch bestimmten und unbestimmten Verfahren.

*Processes involving chip removal using a tool cutting edge are subdivided into operations using geometrically well-defined and geometrically non-defined tool edges.*

Bei Abb. 8.1 (links) dringt der Schneidkeil in den Werkstoff ein, der dadurch elastisch und plastisch verformt wird. Nach Überschreiten der maximal zulässigen werkstoffabhängigen Vergleichsspannung beginnt der Werkstoff zu fließen. Bedingt durch eine vorgegebene Schneidengeometrie bildet sich der verformte Werkstoff zu einem Span aus.

*In Fig. 8.1 (left) the cutting wedge penetrates the material, causing it to undergo elastic and plastic deformation. Once the permissible material-dependent equivalent stress has been exceeded, the material begins to flow. Due to a given cutting edge geometry, the deformed material develops into a chip.*



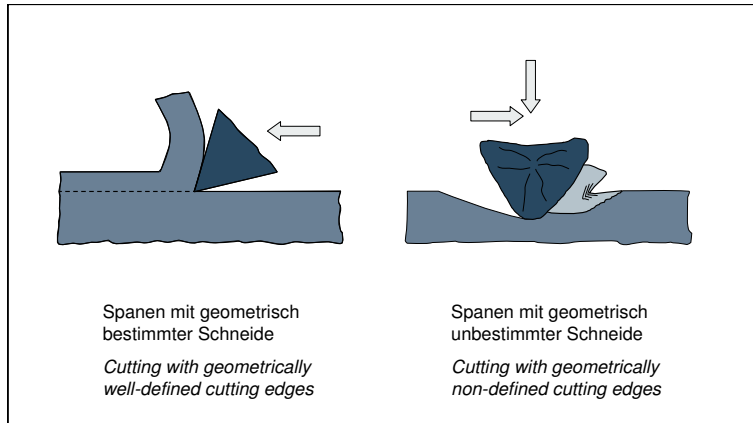


Abb./Fig. 8.1: Spanen mit geometrisch bestimmter und unbestimmter Schneide  
*Cutting with geometrically well-defined and non-defined cutting edges*

Beim Abtrennen mit geometrisch unbestimmter Schneide (siehe Abb. 8.1, rechts) greift eine große Anzahl von Kornspitzen mit unterschiedlichen Schneiden in das Werkstück ein. Dabei werden viele einzelne Späne herausgetrennt. Die Spanbildung ist in der Größenordnung von wenigen Mikrometern, deswegen wird dieses Verfahren überwiegend zur Feinbearbeitung verwendet.

*During cutting operations using a geometrically non-defined cutting edge (see Fig. 8.1, right), a large number of grain tips with different cutting edges act on the workpiece, separating many individual chips. Chips of a few micrometers are formed, which is why this process is mainly used for fine machining.*

## 8.2 Fräsen *Milling*

Das Fräsen gehört zu den Zerspanverfahren mit geometrisch bestimmten Schneiden.

*One example of a cutting operation using geometrically well-defined cutting edges is milling.*

Fräsen (siehe Abb. 8.2) ist ein spanabhebendes Fertigungsverfahren, bei dem das mehrschneidige Werkzeug eine kreisförmige Schnittbewegung ausführt. Vorschub und Zustellbewegung erfolgen meist vom Werkstück, können aber auch vom Werkzeug ausgeführt werden.

*Milling (see Fig. 8.2) is a cutting process during which a tool with multiple cutting edges executes a circular cutting motion. Feed and infeed movements are usually carried out by the workpiece, but they may also be executed by the tool.*

Charakteristisch für das Fräsen ist der unterbrochene Schnitt. Schnittkraft und Temperatur an den einzelnen Schneiden schwanken dadurch erheblich.

*One characteristic of milling is an interrupted cut. This causes the cutting force and temperature on the individual cutting edges to fluctuate considerably.*

Fräsen dient zur Herstellung von ebenen und gekrümmten Flächen, Nuten, Verzahnungen und Gewinden.

*Milling is used to produce planar and curved surfaces, grooves, gears and threads.*

Das Fräsen wird nach der Lage der Werkzeugachse zur bearbeiteten Fläche in Umfangs- und Stirnfräsen unterteilt; außerdem wird zwischen Gleich- und Gegenlauf-Fräsen unterschieden.

*Depending on the position of the tool axis in relation to the machined surface, milling may be divided into peripheral milling and face milling. Besides this, a distinction is made between down-cut and up-cut milling.*

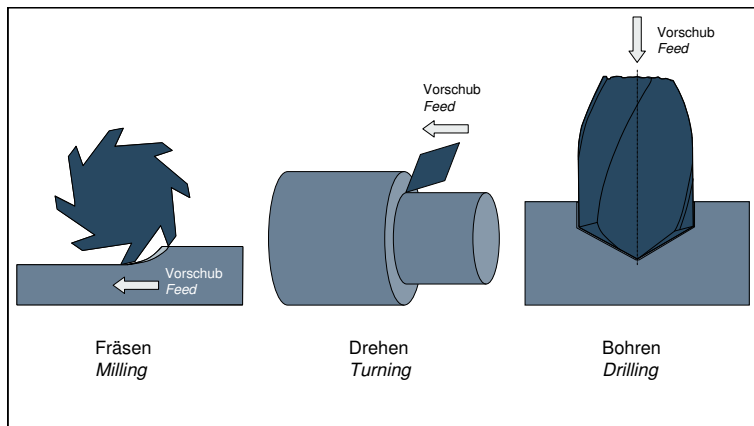


Abb./Fig. 8.2: Trennverfahren: Fräsen, Drehen und Bohren  
*Cutting processes: milling, turning and drilling*

### 8.3 Drehen *Turning*

Das Drehen (siehe Abb. 8.2), ebenfalls ein spanabhebendes Fertigungsverfahren mit geometrisch bestimmter Schneide, ist gekennzeichnet durch eine ununterbrochene Schnittbewegung.

Die Drehbewegung wird meist vom gespannten Werkstück ausgeführt, an dem das einschneidige Werkzeug entlanggeführt wird. In besonderen Fällen kann auch das Werkzeug die Drehbewegung ausführen.

Die Hauptanwendung liegt im Herstellen von Plan- und Mantelflächen an rotationssymmetrischen Werkstücken und im Abstechen von Stangenmaterial. Typische Drehteile sind runde Werkstücke wie Wellen oder Flanschteile.

Nach der Lage der Bearbeitungsstelle am Werkstück werden die Drehverfahren in Außen- und Innendrehen unterteilt, nach der Vorschubrichtung wird zwischen Längs- und Querdrehen unterschieden. Zudem können die Drehverfahren nach der erzeugten Bearbeitungsfläche in Rund-, Plan-, Schraub-, Unrund-, Profil- und Formdrehen unterteilt werden.

### 8.4 Bohren *Drilling*

Mit Bohren (siehe Abb. 8.2) werden spanende Verfahren mit rotatorischer Hauptbewegung bezeichnet, bei denen das Werkzeug eine Schnittbewegung und gleichzeitig eine Vorschubbewegung in Richtung der Drehachse ausführt.

*Turning (see Fig. 8.2), likewise a cutting process using a geometrically well-defined cutting edge, is characterized by an uninterrupted cutting movement.*

*The turning motion is usually carried out by the clamped workpiece, along which a tool with a single cutting edge is guided. Under special circumstances, the tool may also execute the turning movement.*

*Main applications for turning include the production of planar or lateral surfaces on rotationally symmetric workpieces as well as the separation of bar stock. Typical turned parts include cylindrical workpieces, such as shafts or other flanged components.*

*Depending on the position of the machining site on the workpiece, turning processes are subdivided into internal and external turning; depending on the direction of feed, a distinction is made between longitudinal and lateral turning. Furthermore, turning processes may be classified according to the machining surface as cylindrical turning, face turning, thread turning, eccentric turning, profile turning and contour turning.*

*Drilling (see Fig. 8.2) refers to a cutting process with a rotatory principal motion, during which the tool simultaneously executes a cutting movement and a feed movement in the direction of the rotational axis.*

Es dient in erster Linie zur Herstellung von kreisrunden Löchern.

*Drilling primarily serves to produce circular holes.*

Es wird insbesondere zwischen Bohren ins Volle, Aufbohren und Profilbohren (z. B. Zentrierspitze) unterschieden.

*A distinction is made between drilling into solid material, boring, and profile drilling (e. g. producing centers).*

### 8.4.1 Tieflochbohren *Deep-Hole Drilling*

Zum Bohren tiefer Löcher mit einer Länge bis zum 200-Fachen des Bohrerdurchmessers müssen Bohrvorgänge speziell als Tiefbohrvorgänge ausgeführt werden. Dabei werden verschiedene Tiefbohrverfahren angewendet. Der Kühlschmierstoff wird mit hohem Druck durch den Bohrschaft gepresst, tritt an der Bohrspitze aus und spült die Späne über eine Nut im Schaft aus der Bohrung heraus.

*In order to drill deep holes with a length of up to 200 times the diameter of the drill, drilling processes must be carried out as a special deep-hole drilling operation, of which there are various types. The lubricoolant is pressed through the drill at high pressure. It exits at the drill bit and flushes the chips out of the hole via a groove in the drill.*

Mit diesen Verfahren werden enge Bohrungstoleranzen bei hoher Oberflächengüte erreicht.

*This process achieves tight drilling tolerances at a high surface quality.*

## 8.5 Schleifen *Grinding*

Schleifen (siehe Abb. 8.3) ist Spanen mit vielschneidigen Werkzeugen (Schleifkörpern). Die geometrisch unbestimmten Schneiden bestehen aus einer Vielzahl gebundener Schleifkörner und eingeschlossener Poren, die als Spankammern dienen.

*Grinding (see Fig. 8.3) is a cutting operation using tools (abrasive wheels) with multiple cutting edges. The geometrically non-defined cutting edges consist of a number of abrasive grains bonded to the wheel and pore inclusions that serve as chip chambers.*

Das Schleifen wird angewendet, wenn eine gute Maß- und Formgenauigkeit sowie eine hohe Oberflächengüte erforderlich ist. Besonders gut lassen sich harte und schwer zerspanbare Werkstoffe mit diesem Verfahren bearbeiten. Typische Teile sind Stifte, Wellen und Zahnräder nach z. B. einem Einsatz- oder Induktivhärtvorgang.

*Grinding is used whenever a high level of dimensional and shape accuracy as well as a high surface quality is required. This process is particularly suitable for processing hard materials that are difficult to machine. Typical parts include pins, shafts and gear wheels following a case hardening or induction hardening process, for example.*

Nach Art der Werkstückaufnahme wird das Schleifen in Spitzenlos- und Zwischen-Spitzen-Schleifen eingeteilt. Des Weiteren wird zwischen Rund- und Unrund-Schleifen unterschieden.

*Depending on the type of tool holder, grinding is subdivided into centerless and center grinding. Furthermore, a distinction is made between cylindrical and eccentric grinding.*

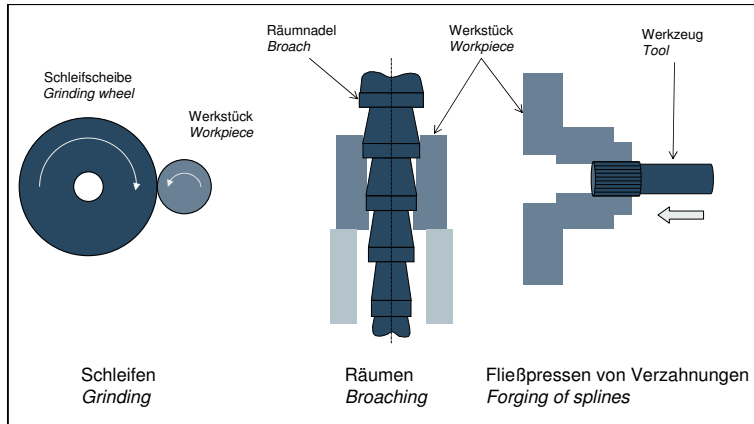


Abb./Fig. 8.3: Verfahren der Weiter- und Fertigbearbeitung  
*Processing and finishing operations*

### 8.5.1 Planschleifen *Surface Grinding*

Das Plan- oder Flachsleifen dient der Erzeugung von Flächen, die entweder vollständig eben sind oder in Hauptvorschubrichtung der Schleifscheibe geradlinig verlaufen.

*Surface grinding produces either completely planar surfaces or ones that run in a straight line in the principal feed direction of the grinding wheel.*

Hier wird unterschieden in Längsschleifen mit gerader oder kreisförmiger Vorschubbewegung, die parallel zu der zu erzeugenden Oberfläche läuft, in Querschleifen mit senkrechter Vorschubbewegung zu der zu erzeugenden Oberfläche und in Umfangschleifen, bei dem das rotierende Werkzeug überwiegend am Umfang mit dem Werkstück in Kontakt ist. Beim Seitenschleifen ist das rotierende Werkzeug überwiegend an einer Seite mit dem Werkstück in Kontakt.

*In longitudinal grinding a distinction is made between a straight or a circular feed motion that runs parallel to the surface being produced. Lateral grinding is subdivided into operations with a perpendicular feed motion in relation to the surface being produced and into peripheral grinding. Peripheral grinding involves the rotating tool being in contact with the workpiece primarily on the circumferential area. In side grinding the rotating tool is in contact with the workpiece primarily on one side.*

### 8.5.2 Rundschleifen *Cylindrical Grinding*

Beim Rundschleifen werden rotationssymmetrische Innen- (Innenrundschleifen) oder Außenflächen (Außenrundschleifen) erzeugt. Das Außenrundschleifen unterteilt sich in Schleifen mit Werkstückspannung und ohne Werkstückspannung (spitzenloses Schleifen).

*During cylindrical grinding, rotationally symmetric internal (internal cylindrical grinding) and external (external cylindrical grinding) surfaces are produced. External cylindrical grinding is subdivided into grinding with workpiece clamping or without (centerless grinding).*

Das spitzenlose Schleifen ohne Werkstückspannung ist ein Schleifvorgang, bei dem das Werkstück frei auf einem Leitlineal (einer Werkstückauflage) aufliegt. Die Drehbewegung des Werkstücks wird durch Reibungskräfte von Schleifscheibe und Regelscheibe erzeugt. Das Werkstück liegt somit zwischen Schleif- und Regelscheibe.

*Centerless grinding without workpiece clamping is a process during which the workpiece is not clamped between centers or in a chuck. Instead, the workpiece lies freely on a work rest. The rotational motion of the workpiece is generated by the frictional forces of the grinding wheel and regulating wheel between which the workpiece lies.*

### 8.5.3 Finishen *Finishing*

Mit dem Superfinish-Verfahren können rotationssymmetrische Bauteiloberflächen ohne Drall erzeugt sowie Oberflächen hinsichtlich des  $R_z$ -Werts verbessert werden. Beim Finishen werden mikrofeine Schleifkörner in einer festen, meist keramischen Bindung verwendet; es ist somit ein Spanen mit geometrisch unbestimmter Schneide.

*The superfinish process allows rotationally symmetric component surfaces to be produced without spiral surface characteristics. It also enhances surfaces with respect to the  $R_z$  value. During finishing, microfine abrasive grains in a solid, mostly ceramic bond are used, thereby rendering it a cutting process with geometrically non-defined cutting edges.*

Das Werkzeug oszilliert mit einer Frequenz von 2 bis 85 Hz und wird unter konstantem Druck auf die rotierende Werkstückoberfläche gepresst. Durch die Überlagerung von Werkstückrotation und Werkzeugoszillation bewegt sich jedes Korn entlang einer Sinuslinie; so wird eine hohe Oberflächengüte und Formgenauigkeit erreicht.

*The tool oscillates at a frequency of between 2 and 85 Hz and is pressed under constant pressure onto the rotating workpiece surface. The overlap of workpiece rotation and tool oscillation moves each grain along a sinusoid. This achieves a good surface quality and geometrical accuracy.*

Man unterscheidet in Band- und Stein-Finishen. Dabei kann nur Stein-Finishen maßgeblich auf die Formgenauigkeit Einfluss nehmen. Ebenfalls wird durch das Finishen der Traganteil erhöht; dies ist zum Beispiel sehr wichtig für Lagersitzflächen.

*A distinction is made between band and stone finishing. It is only stone finishing, however, that has a decisive effect on shape accuracy. Finishing also increases the effective bearing area, an aspect which is highly important for bearing seats.*

## **8.6 Herstellen von Verzahnungen** ***Manufacturing of Gears and Splines***

### **8.6.1 Räumen** ***Broaching***

Räumen (siehe Abb. 8.3) ist ein spanabhebendes Fertigungsverfahren mit geometrisch bestimmten Schneiden.

*Broaching (see Fig. 8.3) is a cutting process using geometrically well-defined cutting edges.*

Auf dem mehrzahnigen Werkzeug liegen die Schneidzähne, jeweils um eine Spandicke gestaffelt hintereinander.

*Each of the cutting teeth on the tool are arranged at a distance of one chip thickness from each other.*

Im Gegensatz zum Fräsen oder Sägen kommt beim Räumen jede Schneide eines Werkzeugs nur einmal während der Bearbeitung eines Werkstücks zum Einsatz. Die Räumwerkzeuge geben meist in einem Arbeitsgang Innen- oder Außenflächen von Werkstücken eine profilierte Form. In der Regel führt das Werkzeug eine geradlinige Schneidbewegung aus, während das Werkstück fest steht.

*In contrast to milling or sawing, each cutting edge of the tool is used only once while machining one workpiece. The broaching tools usually need only one pass to provide the internal and external surfaces of workpieces with a contoured geometry. Usually, the tool carries out a straight cutting movement, while the workpiece is fixed.*

Es gibt aber auch Sonderräumverfahren, bei denen das Werkstück gegenüber dem feststehenden Räumwerkzeug bewegt wird oder bei denen es eine zusätzliche Drehbewegung ausführt (Drall- oder Außenrundräumen).

*However, there are special broaching processes during which the workpiece moves and the broaching tool is fixed, or during which the workpiece executes an additional rotation (twist broaching or external cylindrical broaching).*

Das Räumen wird angewandt, wenn schwierig herzustellende Profile mit hoher Oberflächengüte und großer Formgenauigkeit in Serie gefertigt werden. Typische Anwendungen sind Innenvielzahnprofile (siehe Radnabe Abb. 4.6, rechts oben).

*Broaching is used if profiles that are complex need to be manufactured in series production with a high surface quality and good shape accuracy. Typical applications include internal spline contours (see the wheel hub in Fig. 4.6, upper right).*

### 8.6.2 Kaltwalzen *Cold Rolling*

Beim Kaltwalzen von Verzahnungen wird das Werkstück zwischen zwei Spitzen gespannt. Der Werkzeugsatz besteht aus zwei geraden Walzbacken, die oberhalb und unterhalb des Werkstücks horizontal geführt sind. Die sich gegenläufig und synchron bewegenden Walzstangen versetzen das Werkstück in Rotation. Die verzahnte Funktionsfläche der Walzstangen besteht aus einem abgeschrägten Einlaufbereich, der Arbeitszone, einer Kalibrierzone mit konstanter Zahnhöhe und einem abgeschrägten Auslaufbereich, der Entlastungszone.

*During cold rolling to produce gears, the workpiece is clamped between two centers. The tool set consists of two straight rolling dies which are horizontally guided above and below the workpiece. The rolling racks move in the opposite direction and synchronously cause the workpiece to rotate. The toothed functional surface of the rolling racks consists of a beveled infeed area, the working zone, a calibration zone with constant tooth height, and a beveled outlet area known as the relief zone.*

Alternativ können die Werkzeuge zylinderförmig und links und rechts vom Werkstück angeordnet sein. Dabei führen sie zusätzlich zur Rotation eine radiale Zustellbewegung aus.

*Alternatively, the tools may be cylindrical and aligned on the left and right of the workpiece. In addition to rotating, they also execute an infeed movement.*

Es können Steckverzahnungen mit Modulen zwischen 0,3 und 2 hergestellt werden.

*Splines with modules between 0.3 and 2 may be produced.*



### 8.6.3 Verzahnungsfräsen (Abwälzfräsen) *Gear Milling*

Das Wälzfräsen ist wegen seiner hohen Wirtschaftlichkeit das dominierende Fertigungsverfahren zur Herstellung außenverzahnter, zylindrischer Zahnräder.

*Due to its high cost-efficiency, gear milling is the dominant production process for manufacturing cylindrical gears with external teeth.*



Abb./Fig. 8.4: Gefräste Bauteile  
*Milled parts*

Das Abwälzfräsen wird zur Herstellung von Lauf-, Lamellen- und Steckverzahnungen angewandt (Abb. 8.4). Der Abwälzfräser wird mit einer Drehzahl beaufschlagt und führt langsam längs an der Verzahnung entlang. Gleichzeitig rotiert auch das Bauteil. Die Drehzahl des Werkstücks wird durch das Abstandsmaß der Zähne bestimmt. Die entstehende Zahnform ist durch das Werkzeug vorgegeben.

*Gear milling is used to produce gears and splines (Fig. 8.4). The gear milling cutter rotates and slowly travels along the gear. The part rotates at the same time. The rotational speed of the workpiece is determined by the spacing of the teeth. The tooth geometry that is produced is predetermined by the tool.*

Mit diesem Verfahren lassen sich sowohl gerade als auch schräge Verzahnungen von sehr hoher Qualität produzieren. Ein Beispiel dafür ist auch die Schneckenverzahnung der Exzenterwelle (siehe Abb. 4.5, rechts oben).

*This process may be used to produce both straight as well as inclined gears and splines of very high quality. Another example is the worm gear of the eccentric shaft (see Fig. 4.5, upper right).*

#### **8.6.4 Fließpressen von Verzahnungen** ***Cold Forging of Splines***

Mit diesem Verfahren (siehe Abb. 8.3) lassen sich Innen- und Außenverzahnungen herstellen (Abb. 7.7, Abb. 7.9). Bei einer Außenverzahnung wird eine verzahnte Matrize in axialer Richtung aufgedrückt. Da das Fließpressen in der Entwicklung aufwendiger als die zerspannenden Verfahren ist, rechnet es sich erst ab großen Stückzahlen.

*This process (see Fig. 8.3) is used to produce internal and external gears and splines (Fig. 7.7, Fig. 7.9). In the case of external gears and splines, a toothed die acts in an axial direction. As cold forging is more time- and cost-intensive during development than cutting processes, it is only feasible if large volumes are required.*

Im Vergleich zur Zerspanung wird beim Fließpressen jedoch ein nicht unterbrochener Faserverlauf sowie eine Kaltverfestigung erzielt. Dies erhöht die Dauerfestigkeit. Des Weiteren hat das Fließpressen Vorteile in der Qualität der Verzahnung bezüglich Teilungsfehler und Flankenform, weil diese durch die Werkzeugform abgebildet werden.

*Compared to machining, however, cold forging achieves uninterrupted fiber flow and strain hardening. This increases the fatigue limit. Furthermore, cold forging is advantageous when it comes to the quality of the gears and splines with respect to pitch errors and gear-tooth curve, as these are formed by the shape of the tool.*

Schließlich ist es beim Fließpressen von Innenverzahnungen möglich, Verzahnungen auch in Sacklöchern einzubringen. Dies ist durch das Räumen prinzipbedingt nicht möglich, sodass das Fließpressen hier einen aufgrund der hohen Taktzeit teuren Stoßvorgang ersetzen kann.

*Finally, when cold forging internal gears and splines, it is possible to forge these geometries into blind holes. As broaching does not allow this, cold forging is able to replace a slotting process that is costly due to the high cycle times.*

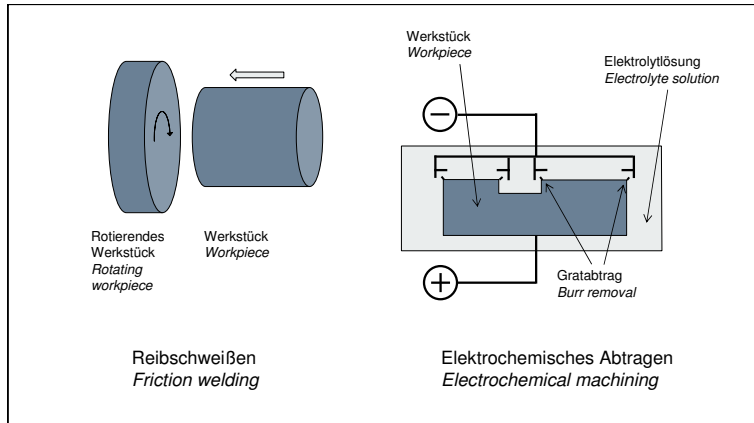


Abb./Fig. 8.5: Reibschweißen und ECM-Bearbeitung  
Friction welding and ECM process

## 8.7 Reibschweißen Friction Welding

Beim Reibschweißen (siehe Abb. 8.5, links) wird eines der zu verbindenden Teile in Rotation versetzt; anschließend werden beide Teile zusammengedrückt. Dabei erwärmen sich die Berührflächen beider Teile durch Reibwärme. Nach Erreichen der notwendigen Schweißtemperatur wird das rotierende Teil stark abgebremst und die beiden Teile mit einer zusätzlichen Stauchkraft zusammengedrückt und dadurch miteinander verschweißt.

Neben gängigen Werkstoffverbindungen wie Stahl/Stahl lassen sich auch Werkstoffe wie Stähle mit sehr hohem Kohlenstoffgehalt oder austenitischem Gefüge sowie Aluminium- oder Magnesiumlegierungen durch Reibschweißen hervorragend verbinden.

During friction welding (see Fig. 8.5, left), one of the parts to be joined is put into rotation before both parts are pressed together. Frictional heat causes the contact surfaces of both parts to increase in temperature. After achieving the necessary welding temperature, the rotating part is rapidly decelerated before both parts are pressed together with an additional upsetting force and then welded.

Besides common material combinations such as steel/steel, materials such as steels with a very high carbon content or austenitic grain structure, or aluminum or magnesium alloys may be joined successfully by frictional welding.

Dies bereitet in anderen Schweißverfahren Probleme. Ebenso sind eine Reihe unterschiedlicher Werkstoffkombinationen wie z. B. Stahl/Kupfer, Stahl/Aluminium oder Aluminium/Magnesium problemlos möglich.

*This is problematic when using other welding processes. A whole range of different material combinations may be used, e. g. steel/copper, steel/aluminum or aluminum/magnesium.*

Somit ist Reibschweißen ein Fügeverfahren, mit dem sich mehr Werkstoffe und Werkstoffkombinationen verbinden lassen als mit jedem anderen Schweißverfahren.

*Friction welding is thus a process that allows more materials and material combinations to be joined than any other type of welding.*

Das Reibschweißen hat zudem den Vorteil, dass die gesamte Reibkontaktfläche verschweißt wird. Es erreicht somit (in Analogie zu anderen Schweißverfahren) eine sehr große Schweißtiefe. Des Weiteren weisen die Schweißflächen keine Oxide auf, da diese durch den Stauchvorgang in den Reibschweißwulst gedrückt werden.

*Friction welding also has the advantage that the entire frictional contact surface is welded, thereby achieving a considerable depth of weld compared to other welding processes. Furthermore, the weld surfaces have no oxides, as these are pressed into the weld bead during the upsetting operation.*

## **8.8 Elektrochemisches Abtragen (ECM)** ***Electrochemical Machining (ECM)***

Beim ECM-Verfahren (Abb. 8.5, rechts) kommt es zu einem elektrochemischen Auflösungsprozess an der Anode. Der Pluspol einer Stromquelle (Anode) wird mit dem Werkstück verbunden, der Minuspol (Kathode) wird an das Werkzeug angeschlossen. Zwischen den beiden Teilen bleibt ein schmaler Spalt, durch den eine Elektrolytlösung strömen kann. Bei eingeschalteter Stromquelle fließt der Strom durch das Elektrolyt vom Werkzeug zum Werkstück. Über eine chemisch-galvanische Reaktion wird ganz gezielt Material vom Werkstück abgetragen.

*ECM operations involve the electrochemical removal of material at the anode (Fig. 8.5, right). The plus pole of a current source (anode) is in contact with the workpiece; the minus pole (cathode) is connected to the tool. Between the two parts a narrow gap remains through which an electrolyte solution may flow. When the current source is activated, the current flows through the electrolyte from the tool to the workpiece. Via a chemical-galvanic reaction, material is removed from the workpiece in a targeted way.*

ECM ist geeignet, um Oberflächen zu konturieren oder um Bohrungen, auch mit Form, einzubringen.

*ECM is suitable for providing surfaces with contours or for introducing (shaped) boreholes.*

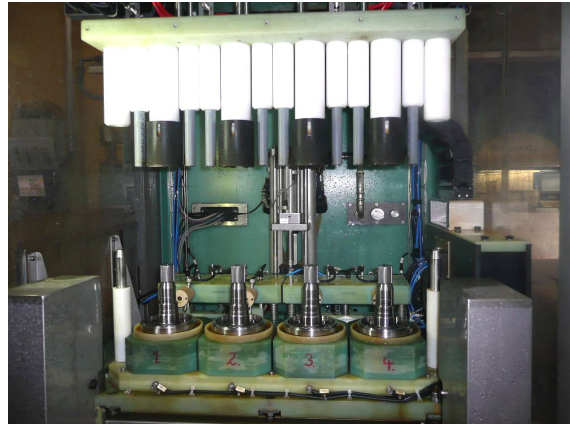


Abb./Fig. 8.6: Elektrochemisches Abtragen  
*Electrochemical machining (ECM)*

An hervorstehenden Formen wie z. B. Graten ist der Abtrag besonders hoch, sodass ECM oft auch für Entgratvorgänge eingesetzt wird (Abb. 8.6).

*With protruding geometries, e. g. burrs, material removal is particularly high. Thus ECM is often used for deburring processes (Fig. 8.6).*

Sämtliche aus leitenden Werkstoffen hergestellte Werkstücke lassen sich mit diesem Verfahren berührungsfrei, ohne jeden thermischen, chemischen oder mechanischen Einfluss, präzise und rationell bearbeiten.

*All workpieces produced from conductive materials can be machined precisely and cost-efficiently using this process, during which there is no tool contact with the workpiece, and no thermal, chemical or mechanical influence whatsoever.*

## 8.9 Montage- und Prüfvorgänge

### *Assembly and Testing Processes*

Zum Abschluss der eigentlichen Bauteilfertigung kann es Sinn machen, dass die bearbeiteten Bauteile, statt einzeln versandt zu werden, zu einer Baugruppe oder einem Subsystem montiert werden. Dies ist besonders sinnvoll, wenn Fertigungsungenauigkeiten in der Bearbeitung zu einer Fehlfunktion des Endprodukts führen. So kann ein closed-loop zwischen Qualitätsprüfung und spanender Fertigung eingerichtet werden, der Kosten spart und Funktionsrisiken minimiert.

Die Qualitätsprüfung umfasst in der Regel deutlich mehr als nur eine Prüfung auf geometrische oder werkstoffliche Bauteilausprägungen. Bei Komponenten mit Innendrucklasten kann die Qualitätsprüfung bis hin zur Leckageprüfung mit Helium gehen.

Bei montierten Subsystemen können die Qualitätskontrollen bis hin zu Funktionsprüfungen reichen. So wird die in Abb. 8.7 dargestellte Nockenwelle rotatorisch beschleunigt, um die Funktion des Dekompressionsmoduls zu testen. Damit kann sehr fertigungsnah der Nachweis über die Funktionsfähigkeit des Subsystems erbracht werden.

*At the end of actual part production, it can make sense to mount the machined components to form an assembly or subsystem instead of dispatching each part individually. This is particularly advisable if production inaccuracies in machining lead to a malfunction of the end product. In this way, a closed loop is established between quality inspection and machining, which results in cost savings and minimizes functional risks.*

*The quality inspection usually encompasses far more than merely checking for compliance with geometrical and material specifications. In the case of components with internal compressive loads, the quality inspection may extend to leak testing with helium.*

*In the case of mounted subsystems, quality checks may even include functional tests. For example, the camshaft shown in Fig. 8.7 is accelerated rotationally to test the function of the decompression module. This allows the functionality of the subsystem to be verified close to production.*



Abb./Fig. 8.7: Nockenwelle für ein Motorrad mit Dekompressionsmodul  
*Motorcycle camshaft with decompression module*

# 9 Verfahrenskombinationen

## *Process Combinations*

### 9.1 Kombinationen von Umformverfahren

#### *Combining Metal Forging Processes*

Wie in den vorherigen Kapiteln dargestellt, hat jedes der verschiedenen Umformverfahren spezifische Eigenschaften. Da die Präzisionsumformung von Stahl insbesondere für den Automobilsektor immer wichtiger wird, ist die Weiterentwicklung der Herstellungsverfahren Kalt-, Halbwarm- und Warmumformung aber auch deren Kombination von zunehmender Bedeutung.

*As already outlined in the preceding chapters, each of the various metal forging processes has specific characteristics. As precision forging of steel continues to grow in importance, especially in the automotive sector, it is crucial that cold, warm and hot forging processes, as well as combinations of these, continue to be developed.*

Insbesondere durch die Kombination der verschiedenen Umformverfahren lassen sich die jeweils spezifischen Technologiepotenziale miteinander am Bauteil ausnutzen. So können zur Herstellung eines Werkstücks das hohe Umformvermögen der Warmumformung mit der hohen Genauigkeit des Kaltumformens verbunden werden.

*It is the combination of the various forging processes, in particular, which allows specific benefits to be drawn from each technology. It is thus possible, when producing a component, to combine the good formability achieved in hot forging with the high level of precision that cold forging brings.*

#### 9.1.1 Kombination von Warm- und Kaltmassivumformen

##### *Combining Hot and Cold Forging*

Die Kombination der Verfahren Warm- und Kaltmassivumformen wird in der modernen Fertigungstechnologie immer häufiger eingesetzt. Dabei werden die in den jeweiligen Kapiteln beschriebenen Prozessschritte nacheinander durchlaufen. Das in Abb. 9.1 (oben, Mitte und rechts) dargestellte Parksperrrennrad ist ein Beispiel für die Fertigung von Bauteilen durch eine Kombination beider Verfahren.

*A combination of hot and cold forging is being used increasingly in modern production engineering. Such a combination involves a sequence of those process steps already described in the previous chapters. The parking gear depicted in Fig. 9.1 (upper center and upper right) is an example of a component produced by a combination of both processes.*



In einem Warmumformprozess werden zunächst die Bauteile im Wesentlichen in die Geometrie des Parksperrnads vorgepresst. Auf der Verzahnung wird bei der Warmumformung ein gewisses Aufmaß berücksichtigt. Danach wird die Verzahnung in einem Kaltumformverfahren reduziert und damit in eine einbaufertige Form gebracht. Dies ermöglicht Bauteile mit besonders geringer Einbaulänge (kein Auslauf wie bei einem Stoßvorgang notwendig), bei optimalen Fertigungskosten.

*The parts are hot forged into the basic geometry of the parking gear. A certain allowance is taken into account on the splines during hot forging. After this, the splines are reduced during a cold forging operation, and thereby formed into a shape that is ready-for-assembly. A part may thus be produced with a very small assembly length (no runout necessary as with a slotting operation) and optimum production costs.*



Abb./Fig. 9.1: Durch Kombination von Warm- und Kaltumformung hergestellte Teile  
*Parts produced by a combination of hot and cold forging*

Die Abtriebswelle in Abb. 9.1 (links) wird zuerst warm umgeformt. Nach einem Feinstrahlen und einer Oberflächenbeschichtung werden bestimmte Oberflächenbereiche kalt kalibriert, um die Parallelität zueinander und den Traganteil der einzelnen Flächen zu erhöhen. Ähnliches gilt für die Planetenträger in Abb. 9.1 (unten Mitte und unten rechts).

*The output shaft shown in Fig. 9.1 (left) first undergoes hot forging. After fine blasting and surface coating, certain regions of the surface are cold calibrated to increase both the parallelism between the regions as well as the effective bearing area of the individual surfaces. A similar process is used for producing the planet carriers shown in Fig. 9.1 (lower center and lower right).*

### 9.1.2 Kombination von Pressverfahren mit Rundkneten *Combining Forging on Presses with Swaging Operations*

Bei der Flanschswelle in Abb.9.2 wird zuerst der Flansch warm umgeformt. Inzwischen gibt es derartige Vorformen auch schon von automatischen langhubigen Halbwarmmaschinen. Anschließend wird der Hinterschnitt am Schaft durch Halbwarm-Rundkneten erzeugt.

In diesem Fall werden also nicht nur unterschiedliche Umformtemperaturen, sondern auch völlig unterschiedliche Umformverfahren miteinander kombiniert. Das Verfahren Rundkneten ermöglicht dabei sogar, den Schaft hohl auszuführen.

*The flanged shaft shown in Fig. 9.2 is produced by firstly hot forging the flange. Such preforms can now be produced on automated long-stroke warm forging machines. Following this, the undercut is generated on the shaft by means of warm swaging.*

*In this case, not only different forging temperatures are combined but also completely different forging processes. The swaging operation even enables hollow shaft design.*



Abb./Fig. 9.2: Flanschswelle  
*Flanged shaft*

### 9.1.3 Kombination von Halbwarm- und Kaltmassivumformen *Combining Warm and Cold Forging*

Durch eine Kombination von Halbwarm- und Kaltmassivumformverfahren lassen sich immer dann Werkstücke wirtschaftlich fertigen, wenn zum einen eine hohe Maßgenauigkeit gefordert ist und zum anderen der Umformgrad so groß ist, dass beim Kaltpressverfahren mindestens einmal eine Zwischenglühung stattfinden müsste.

Die Prozessfolge entspricht hier einer Aneinanderreihung der Verfahrensschritte, die im Kapitel Halbwarmumformung und im Kapitel Kaltumformung bereits ausführlich beschrieben wurden. Nach der Halbwarmumformung müssen die Werkstücke lediglich gestrahlt und vorbeschichtet werden.

Die in Abb. 9.3 (oben links und Mitte) dargestellten Tripodenwellen für Gleichlaufschiebegelenke sind aus dem induktiv härtenden Stahl C45 mod gefertigt. Nach dem Halbwarmpressen werden die Massivumformteile beschichtet und kalt abgestreckt. So lassen sich Rollenlaufbahnbreiten in der Innenkontur mit einer Toleranz von nur  $\pm 0,04$  mm bis  $\pm 0,06$  mm, je nach Größe des Bauteils, herstellen. Die Linienformtoleranz in der Rollenlaufbahn beträgt dabei  $0,02 - 0,04$  mm, wiederum abhängig von der Bauteilgröße.

Damit ist keine spanende Nacharbeit mehr nötig. Nach dem Induktionshärten dürfen diese hochpräzisen Bauteile eine Laufbahntoleranz von nur  $\pm 0,1$  mm aufweisen, sodass eventuelle Härteverzüge bereits vorgehalten werden müssen.

*A combination of warm and cold forging makes sense for producing workpieces if a high dimensional accuracy is required, and if the plastic strain is so significant that intermediate annealing would be necessary at least once during cold forging.*

*Again, the sequence of processes corresponds to those already detailed in the chapters about warm forging and cold forging. Following the warm forging operation, the workpieces need to be shotblasted and precoated.*

*The tripod shafts for constant velocity joints shown in Fig. 9.3 (upper left and center) are produced from C45 mod induction hardening steel. Following warm forging, the parts are coated and cold ironed. This allows the inner contour of the bearing surfaces to be produced with a tolerance of only  $\pm 0.04$  mm to  $\pm 0.06$  mm, depending on the size of the component. The line tolerance in the bearing surface amounts to  $0.02 - 0.04$  mm, again depending on component size.*

*This renders subsequent machining unnecessary. Following induction hardening, these high-precision components can display a ball track tolerance of only  $\pm 0.1$  mm. Possible hardening distortions must thus be precorrected.*



Abb./Fig. 9.3: Bauteile aus Prozesskombination halbwarm - kalt  
*Parts produced by combining warm and cold forging*

Auch die oben (Abb. 9.3) dargestellten Rzeppa-Gelenkwellenteile werden aus dem Stahl Cf 53 hergestellt, der sich nur begrenzt kalt umformen lässt. Gleichzeitig werden aber sehr hohe Anforderungen an die Maß- und Formtoleranzen gestellt, um die aufwendige spanende Hartbearbeitung in den Laufbahnen auf ein Minimum zu reduzieren.

Da diese Anforderungen durch Warmgeschmieden nicht zu erreichen sind und der Umformgrad für eine reine Kaltumformung deutlich zu groß ist, werden diese Bauteile durch eine Kombination von Halbwarmpressen und anschließendem Kaltkalibrieren hergestellt.

Während der Halbwarmoperationen wird das Bauteil in mehreren Stufen umgeformt. Diese Bauteile werden kontrolliert auf einem Laufband abgekühlt.

*The Rzeppa-type CV joint outer race (Fig. 9.3, upper half) is also produced from Cf 53 steel. This steel can only undergo a limited amount of cold forging. At the same time, however, great demands are placed on dimensional and shape tolerances in order to minimize the time-consuming hard machining process in the ball tracks.*

*As these requirements cannot be met through hot forging, and as the plastic strain is clearly too great for a pure cold forging operation, these components are produced by a combination of warm forging and subsequent cold calibration.*

*During the warm operations, the part is forged in several stages. These components then undergo controlled cooling on a conveyor belt.*

Die Durchmesser der kalt gepressten Kugellaufbahnen auf der Innenseite der Gelenkwellen werden mit einer Genauigkeit von  $\pm 0,1$  mm prozesssicher hergestellt. Nach dem Induktivhärten müssen die Kugellaufbahnen nur noch auf Fertigmaß geschliffen oder gefräst werden.

*The diameters of the cold pressed ball tracks on the inner side of the CV joints are produced with assured quality to a precision of  $\pm 0.1$  mm. Following induction hardening, the ball tracks then need to be ground or milled to achieve their finished dimensions.*

Das in Abb.9.3 (oben rechts) dargestellte Endstück ist ebenso durch eine Kombination von Halbwarm- und Kaltumformung hergestellt.

*The endpiece shown in Fig. 9.3 (upper right) is likewise produced by a combination of warm and cold forging.*

In der ersten Umformung (halbwarm) wird ein Napf mit Schaft gepresst. Bei der anschließenden Kaltumformung wird der Schaft verjüngt und der Absatz reduziert. Danach kann eine einbaufertige Verzahnung gepresst werden. Der ursprüngliche Fertigungsprozess sah eine Drehbearbeitung mit anschließendem Wälzfräsen der Verzahnung vor. Dieser Prozess benötigt jedoch einen längeren Auslauf. Durch das Fließpressen der Verzahnung konnte die Länge reduziert und somit das Gewicht verringert werden.

*During the first forging operation (warm), a cup with a shaft is manufactured. The shaft is then further extruded in a subsequent cold forging process, and the shoulder is reduced. Following this, ready-for-assembly splines may be forged. The original production process involved a turning operation with subsequent milling of the splines. The drawback of this process was the longer runout required. By extruding the splines, the length and thus the weight of the part were reduced.*

## **9.2 Kombination von Umformverfahren mit Zerspanung** ***Combining Metal Forging and Machining Processes***

Neben der Herstellung von Werkstücken, die durch Umformung umfänglich oder in Teilbereichen Endabmessung erhalten (Net-Shape-Umformung), benötigen einige Bauteile nach der umformenden Prozessfolge eine Zwischenzerspanung. Es ist wichtig, die gesamte Prozesskette Umformung - Zerspanung und nicht nur Teilschritte zu betrachten.

*In addition to the production of workpieces which, through forging, completely or partially have the finished size (net-shape forging), some parts require intermediate machining after the forging process sequence. It is important to view the entire process chain of metal forging and machining as a coupled process and not merely as separate steps.*

Durch die intelligente Abstimmung von Umformung und erster Aufspannung können umgeformte Teile ohne Kaltkalibriervorgang zu präzisen Fertigprodukten weiterverarbeitet werden. Andererseits kann ein Kaltkalibrieren die Anzahl der Aufspannungen und den Zerspanaufwand deutlich reduzieren.

*By using an intelligent coordination of forging and initial clamping, it is possible to enable forged parts to be made into precision finished products without the need for cold calibration. Having said that, though, cold calibration can reduce the number of clampings and the machining efforts to a considerable extent.*

Des Weiteren gibt es noch Prozessketten, bei denen ein Zerspanprozess zwischen zwei Umformvorgängen stattfindet.

*Additionally, there are manufacturing sequences in which a machining process takes place in between forging processes.*

Die nachfolgenden Beispiele sollen zeigen, wie die Prozessschritte Umformen und Zerspanen sinnvoll miteinander kombiniert werden können.

*The following examples will help to show how metal forging and machining can be usefully combined.*



Abb./Fig. 9.4: Kombination von Massivumformung mit Zerspanung  
*Combining forging and machining*

Eine wirtschaftliche Fertigung von Hohlwellen kann bei bestimmten Getriebewellengeometrien durch die Kombination von Kaltfließpressverfahren und Tieflochbohren erreicht werden. Dabei gilt es, eine kostenoptimale Fertigungsfolge der Umform- und Zerspanungsprozesse unter Berücksichtigung der geforderten Maß- und Formtoleranzen zu finden und gleichzeitig die Vorteile der Kaltumformung zu nutzen.

*In the case of certain transmission shaft geometries, it is possible to produce hollow shafts economically by employing a combination of cold extrusion and deep-hole drilling. It is important to establish a cost-efficient production sequence involving metal forging and machining processes with a view to the required dimensional and shape tolerances. At the same time, the benefits associated with cold forging must be exploited.*

Eine Hohlwelle (siehe Abb. 9.4, unten rechts) wird ausgehend von gescherten Stababschnitten durch Kopfstauchen zunächst kalt umgeformt.

*Starting with sheared bar sections, a hollow shaft (see Fig. 9.4, lower right) is firstly cold forged by heading.*

Durch das nachfolgende Tieflochbohren wird eine form- und lagegenaue Bohrung erzeugt.

*The deep-hole drilling which follows allows bores with geometric and positioning accuracy to be produced to a high precision.*

Die Endkontur der Welle wird zum Schluss durch weitere Kaltreduziervorgänge gefertigt.

*The final shaft contour is achieved after drilling by means of cold reducing operations.*

Je nachdem ob eine Wanddickenabnahme oder eine der Außenkontur nachgeführte Innengeometrie bei gleicher Wandstärke erzielt werden soll, werden die Kaltprozesse entsprechend eingestellt.

*The relevant cold processes are selected depending on whether the goal is to reduce wall thickness or to create an inner geometry that traces the outer contour with the same wall thickness.*

Es entsteht eine Innengeometrie mit Hinterschnitt, die sich nicht rein zerspanend fertigen lässt.

*An inner geometry with undercut is generated that cannot be produced purely by machining.*

Auf Zwischenglühen oder erneutes Oberflächenbehandeln wird verzichtet. Die Durchmesser-toleranzen betragen innen wie außen 0,2 mm, der Rundlauf ist auf maximal 0,5 mm eingeschränkt. Die Gewichtssparnis gegenüber der Vollwelle beträgt über 20 %.

*Intermediate annealing or a second precoating of the surface is not needed. The diameter tolerances amount to 0.2 mm on the inside and the outside; the runout is limited to a maximum of 0.5 mm. Weight savings of over 20 % are achieved compared to a solid transmission shaft.*

Abb. 9.4 (Mitte oben) zeigt ein Bauteil im einbaufertigen Zustand, das durch Kaltumformung kombiniert mit einem nachgeschalteten Zerspanungsarbeitsgang hergestellt wird.

Dieser Abtriebsflansch (Werkstoff C35) dient als Schnittstelle zwischen Getriebe- und Verteilergetriebe in einem Geländewagen. Die geforderte Verzahnungsgenauigkeit der beiden Steckverzahnungen entspricht der Toleranzklasse 8 (DIN 5480).

Der ursprüngliche Fertigungsprozess sah die Herstellung der gesamten Komponente durch Zerspanung vor.

Das Bauteil wird zunächst einschließlich der einbaufertigen größeren Verzahnung in einem Kaltfließpressvorgang gefertigt, wobei die einbaufertige Verzahnung durch Napfrückwärtsfließpressen eingebracht wird. In der anschließenden Zerspanoperation wird zunächst der Überlauf der gepressten Verzahnung und der untere Bereich bearbeitet und die zweite Verzahnung in einer Räumoperation eingebracht.

Die durch diese Fertigungsfolge erzielten Vorteile sind zum einen eine Kostenreduzierung des Bauteils um 46 % durch die Eliminierung des teuren Verzahnungsstoßens und zum anderen eine Erhöhung des übertragbaren Drehmoments durch Erhöhung der Zahnfußfestigkeit um 25 % bis 30 % aufgrund eines beanspruchungsgerechten Faserverlaufs und der vollständigen Anbindung der Zähne an den Boden.

Ein weiterer Vorteil ist die deutliche Reduzierung des benötigten Materialanteils. Schließlich kann das Werkstück kürzer ausgeführt werden, da der Werkzeugauslauf des Stoßvorgangs nicht benötigt wird.

*Fig. 9.4 (upper center) shows a ready-for-assembly component produced by a combination of cold forging and a subsequent machining operation.*

*This output flange (C35 steel) serves as an interface between the automatic and transfer gear in an off-road vehicle. The necessary gear accuracy of both splines corresponds to tolerance class 8 (DIN 5480).*

*Originally, the production process was intended to be a pure machining operation.*

*The component, including the ready-for-assembly larger spline, is initially produced in a cold extrusion process, during which the assembly-ready splines are introduced by means of backward cup extrusion. In the machining operation which follows, the excess material from the pressed splines and the lower area are machined first, after which the second spline is broached.*

*The advantages of this production sequence include the 46 % reduction in the costs of the component. This is achieved in particular by eliminating an expensive spline machining operation (slotting). An additional benefit is an increase in the transferable torque by means of a 25 % to 30 % improvement in the tooth base strength. This is due to a fiber flow that can optimally withstand the stresses, and due to a good connection of the teeth with the lower section.*

*A further advantage is the considerable reduction in the material required. Finally, the workpiece becomes shorter because the tool exit length for the slotting operation is not necessary.*



Der Dreiarmflansch in Abb. 9.4 (Mitte unten) wird zuerst durch Gesenkschmieden hergestellt. Die Funktionsflächen werden zerspannt, und es wird in das Sackloch eine Kerbverzahnung eingepresst. Diese Geometrie ist rein zerspanend nicht oder nur sehr aufwendig (Stoßvorgang) herstellbar.

*The three-armed flange in Fig. 9.4 (lower center) is firstly produced by means of closed-die forging. The functional surfaces are machined and splines are forged into the blind hole. This geometry cannot be produced purely by machining, unless elaborate and costly processes are used (slotting).*

Beim Lamellenträger (siehe Abb. 9.4, links unten) wird die Verzahnung durch Kaltumformung in einen Rohling eingebracht, der halbwarm vorgeformt wurde. Diese Verfahrenskombination ist deutlich wirtschaftlicher als die reine zerspannte Alternativlösung.

*When producing disk carriers (see Fig. 9.4, lower left), cold forging is used to introduce splines into a billet that has been forged using a warm process. This process combination is significantly more cost-efficient than alternative machining solutions.*

Der Lamellenträger in Abb. 9.4 (links oben) wird halbwarm in mehreren Stufen umgeformt. Die Verzahnung des Lamellenträgers wird wälzgefräst, wobei die Steckverzahnung fließgepresst wird. Wichtige Funktionsflächen werden auf Endmaß zerspannt. Im Anschluss daran wird die Steckverzahnung induktiv gehärtet.

*The disk carrier in Fig. 9.4 (upper left) is warm forged in several stages. The disk carrier spline is produced by milling, while the splines on the shaft are extruded. Important functional surfaces are machined to their final dimensions. Subsequent to this, the spline is induction hardened.*

Die Umformung der großen Verzahnung befindet sich in Entwicklung.

*Forging of the large spline is under development.*

In hochmotorisierten Fahrzeugen ersetzt das geschmiedete Aluminium-Stützlager (siehe Abb. 9.4, rechts oben) die in leichteren Fahrzeugversionen verbauten Gussteile, da diese den hohen Belastungen nicht mehr standhalten. Der Rohling wird mehrstufig bei circa 500 ° umgeformt. Im Anschluss an Zerspanungsvorgänge wird ein Gummilager eingepresst und eingebördelt.

*In high-power vehicles, forged aluminum strut mounts (see Fig. 9.4, upper right) replace cast parts assembled in lighter vehicle types, as these were no longer able to withstand the high loads. The billet is forged in several stages at around 500 °. After the machining processes, a rubber bearing is pressed and crimped in.*

# 10 Werkstoffe und Wärmebehandlung

## *Materials and Heat Treatment*

### 10.1 Umformbare Werkstoffe

#### *Metals Suitable for Forging Operations*

Zum Umformen eignen sich grundsätzlich alle Metalle, die auf eine fortschreitende Spannungsbelastung nicht mit Bruch, sondern mit plastischer Verformung reagieren. Die Entscheidung, ob eine Umformung auch technisch und wirtschaftlich umsetzbar ist, hängt dann davon ab, welches Fließspannungsniveau herrscht (Werkzeugbelastung) und wie viel Verformung der Werkstoff bis zum Eintritt des duktilen Bruchs ermöglicht (Formgebungsmöglichkeit).

*Metals which are suitable for forging are generally those which react to increasing mechanical stress not by fracturing but with plastic strain. The decision as to whether a forging process is technically and financially feasible depends on the level of yield stress that prevails (tool load) and on how much deformation the material can undergo before ductile fracture occurs (formability).*

Hierbei spielt Stahl eine besondere Rolle, da eine Vielfalt von genormten Stahlsorten mit unterschiedlichen Eigenschaften verfügbar sind. Die Eigenschaften des Werkstoffs lassen sich durch Umformen und Wärmebehandlung in weiten Grenzen beeinflussen und so den verschiedensten Anforderungen anpassen.

*Steel plays a particularly important role due to the sheer diversity of standardized steel grades with different properties that are available. The material properties can be influenced by metal forging and heat treatment to a considerable degree and can thus be adapted to meet the most diverse demands.*

Stahl ist vollständig wiederverwertbar, sodass keine Entsorgungsprobleme bestehen. Wichtige Eigenschaften des Stahls sind Härte, Zugfestigkeit, Elastizität und Zähigkeit sowie Dauerfestigkeit, Warmfestigkeit, Verschleißwiderstand, Korrosionsverhalten und Zerspanbarkeit. Für die spezifischen Eigenschaften sind in erster Linie die chemische Zusammensetzung (Art und Menge der Legierungsbestandteile) sowie der Wärmebehandlungszustand (Gefügeausbildung) maßgebend.

*Steel is completely recyclable and therefore causes no disposal problems. Important properties of steel include high values of hardness, tensile strength, elasticity and toughness, as well as fatigue strength, temperature stability, resistance to wear, good corrosion behavior and machinability. The specific properties are defined primarily by the chemical composition (the type and amount of alloying components), as well as by the heat treatment state (microstructure).*

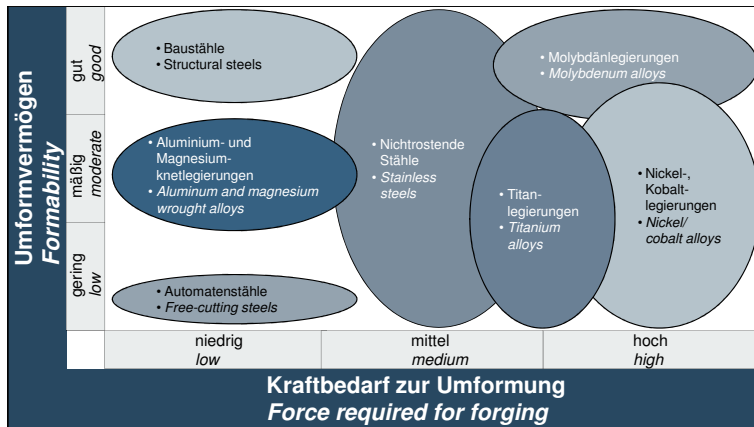


Abb./Fig. 10.1: Umformverhalten unterschiedlicher Werkstoffgruppen  
*Forging behavior of different groups of metals*

Das Umformverhalten und der daraus resultierende Kraftbedarf bei der Umformung ist bei den verschiedenen Werkstoffen unterschiedlich (siehe Abb. 10.1).

*The metal forging behavior and the resulting force required to carry out deformation is different for each material (see Fig. 10.1).*

### 10.1.1 Stahlwerkstoffe **Steel Materials**

Für Umformteile werden ausgehend vom unlegierten Kohlenstoffstahl über niedrig legierte bis hin zu hochlegierten Stahlsorten alle Stähle verwendet. Diese sind in internationalen, nationalen und Herstellernormen definiert. Für die Warmumformung eignen sich alle niedrig und hochlegierten Stähle.

*Every type of steel can be forged, from the unalloyed carbon and low alloy varieties through high alloy grades. These grades are all defined in international, national and manufacturers' standards. All low and high alloy steels lend themselves well to hot forging.*

Im Bereich der Benzineinspritzung erobern sich gerade geschmiedete rostfreie Stähle den Markt. Gegenüber gesinterten Bauteilen sind sie absolut druckdicht.

*In the area of gasoline injection, forged stainless steels are currently the market. Compared to sintered parts, they are absolutely pressure-tight.*

Als Monoblockbauteil sparen sie gegenüber gebauten Bauteilen Fügeoperationen und Handling von mehreren Teilen und bieten gegenüber z. B. gelöteten Verbindungen höchste Leckagesicherheit.

*As a monoblock component, they save on joining operations and handling several parts compared to assembled parts. Compared to soldered joints, they provide maximum leak protection.*

Speziell entwickelt für die Warmumformung wurden die ausscheidungshärtenden ferritisch-perlitischen Stähle nach DIN EN 10267 (AFP-Stähle). Durch die Legierung mit Vanadium und Stickstoff zeigen diese Stähle eine Ausscheidungshärtung bei der kontrollierten Abkühlung aus der Schmiedehitze.

*Dispersion-hardening steels have been specially developed for hot forging according to DIN EN 10267. By alloying them with vanadium and nitrogen, these steels show precipitation hardening during controlled cooling from the forging heat.*

Für die Halbwarmumformung können weitgehend die gleichen Werkstoffe wie bei der Warmumformung eingesetzt werden mit Ausnahme der AFP-Stähle und einiger nichtrostenden Güten.

*With the exception of the dispersion-hardening steels and some stainless steel grades, the same materials may generally be used for warm forging as for hot forging.*

Für die Kaltumformung eignen sich vorzugsweise niedrig legierte Einsatz- und Vergütungsstähle mit einem Kohlenstoffgehalt von bis zu 0,5 % und einem Legierungsanteil von maximal 5 %.

*With respect to cold forging, it is primarily low alloy case-hardening or heat-treatable steels which are used, with a carbon content of up to 0.5 % and an alloying component of up to a maximum of 5 %.*

Wenngleich es mehrere Tausend genormte Stähle gibt, ist die Entwicklung von neuen Güten für die Massivumformung bei Weitem nicht abgeschlossen. So kommen aktuell bainitische Analysen in die Vermarktung, die in der einfachen Prozesskette der AFP-Stähle (Umformen, Abkühlen) verarbeitet werden können, die aber ohne zusätzliche Vergütebehandlung die Eigenschaften von Vergütungsstählen annehmen.

*Even though there are several thousand standardized steels, development of new grades for forging is by no means exhausted. For example, bainitic analyses are coming onto the market. These may be used in the simple process chain of dispersion-hardening steels (forging, cooling) and, without additional quenching and tempering they take on the properties of heat-treatable steels.*

Weitere Entwicklungen für Strukturbauteile sind Stähle mit TRIP-Effekt oder Maraging-Stähle, die jeweils attraktive Eigenschaften aufweisen. Der Entwicklungsschwerpunkt liegt bei diesen Güten darauf, sie für die Massivumformung verfügbar zu machen und mit möglichst kostengünstigem Legierungskonzept auch für automobiler Anwendungen kostenseitig akzeptabel zu gestalten.

*Further developments for structural components include steels with TRIP effect or maraging steels, each of which demonstrate attractive properties. The focus of development with these grades lies in making them available for forging as well as in employing a highly cost-effective alloying concept for economic application in cars.*

Es werden des Weiteren Einsatzstähle entwickelt, die bei höheren Temperaturen aufgekühlt werden können und dabei feinkörnig bleiben oder die eine hohe Härte bei geringen Legierungskosten aufweisen. Damit tragen alle diese Stahlewicklungen dazu bei, dass energie- und ressourceneffizientere, leistungsfähigere Komponenten kosteneffizient eingesetzt werden können.

*Furthermore, case-hardening steels are being developed which can be carburized at high temperatures, thereby remaining fine-grained. Others demonstrate good hardenability with low alloying costs. All of these steel developments assist in ensuring that components with greater energy and resource efficiency as well as higher performance may be used in a cost-efficient way.*

### 10.1.2 Nichteisenmetalle *Non-Ferrous Metals*

Im Vergleich zu Stahl werden Nichteisenmetalle in wesentlich geringerer Menge für umformtechnische Fertigungsprozesse verwendet. Technische Bedeutung haben Aluminium, Kupfer sowie Titan, Nickel, Magnesium, Kobalt, Wolfram und ihre Legierungen. Je nach Werkstoff wird bei geeigneten Temperaturen umgeformt, wobei werkstoffspezifische Fließspannungen und Umformvermögen berücksichtigt werden müssen.

*In contrast to steel, non-ferrous metals are not as widely employed in metal forging production processes. Of industrial importance, however, are aluminum and copper, as well as titanium, nickel, magnesium, cobalt, tungsten and alloys thereof. Forging takes place at suitable temperatures depending on the material and taking into account material-specific yield stresses and deformability.*

Für die Warmumformung von Aluminium werden überwiegend aushärtbare Knetlegierungen verwendet. Diese zeichnen sich durch sehr gute Korrosionsbeständigkeit und gutes Tieftemperaturverhalten aus. Geschmiedete Aluminiumteile werden vorwiegend dort verwendet, wo ein niedriges Bauteilgewicht bei hoher Betriebsfestigkeit gewünscht wird, z. B. im Flugzeug- und im Fahrzeugbau.

Magnesium gewinnt neben dem Aluminium zunehmend Bedeutung als Leichtbauwerkstoff. Es weist im Vergleich zum Aluminium eine noch geringere Dichte auf, bietet dafür aber auch nur einen geringeren E-Modul und geringere Festigkeiten. Besonders für Bauteile, die funktionsbedingt eine Verbindung zwischen weiter entfernten Anbindungspunkten darstellen müssen, kann Magnesium eine interessante Werkstoffalternative sein.

Geschmiedetes Magnesium bietet dabei eine gute Kombination aus Festigkeit und Duktilität. Für einen breiteren Einsatz dieses Werkstoffs in automobilen Anwendungen muss aber das Ermüdungsverhalten noch besser für die Auslegung quantifiziert werden. Ebenso müssen die Korrosionsaspekte, besonders im direkten Kontakt mit anderen metallischen Bauteilen, gelöst werden.

Titan und Titanlegierungen weisen das günstigste Festigkeit-Dichte-Verhältnis aller Konstruktionswerkstoffe auf. Infolge der Schwierigkeiten bei der Herstellung und Verarbeitung liegt der Preis jedoch relativ hoch, sodass die Verwendung weitestgehend auf die Luft- und Raumfahrt sowie auf Sonderfälle im Maschinenbau und im medizinischen Bereich beschränkt ist.

*Age-hardenable wrought alloys are the principal stock for the hot forging of aluminum. These are highly corrosion-resistant and display good low temperature characteristics. Forged aluminum parts are used primarily in applications requiring lightweight components with high fatigue strength, such as aircraft and vehicle construction.*

*Besides aluminum, magnesium is also increasingly gaining importance as a lightweight material. Compared to aluminum, it demonstrates an even lower density. For that, however, it also has a lower Young's values modulus and lower strength particularly for parts which function as a connection between remote points, magnesium may represent an interesting alternative material.*

*Forged magnesium provides a good combination of strength and ductility. However, for broader application of this material in automotive applications, the fatigue behavior needs to be quantified even better for design purposes. Likewise, the corrosion aspects, particularly in direct contact with other metal components, needs to be solved.*

*Titanium and its alloys display the most optimum ratio of strength to density among all structural materials. Due to difficulties in production and processing, costs are relatively high, thus limiting its use mainly to the aerospace industry, or other high performance mechanical engineering or medical applications.*

Warmumformteile aus Legierungen auf der Basis von Nickel, Kobalt oder Wolfram zeichnen sich durch eine sehr hohe Warmfestigkeit aus. Sie werden in erster Linie für Turbinenscheiben und Turbinenschaufeln verwendet sowie für Sonderanwendungen.

*Hot forged parts made of alloys based on nickel, cobalt or tungsten exhibit superior high temperature strength. They are almost exclusively used for turbine engine disks and blades, as well as other special applications.*

Umformteile aus Kupfer und Messing werden vorwiegend im Armaturenbau, in der Elektrotechnik und in der Feinmechanik eingesetzt. Sie sind korrosionsbeständig und verfügen über gute elektrische Eigenschaften.

*Forged parts made of copper and brass are used primarily for fittings, in electrical engineering and in precision mechanics. They are corrosion-resistant and have good electrical properties.*

## **10.2 Wärmebehandlung von Umformteilen aus Stahl**

### ***Heat Treatment of Forged Steel Parts***

Die für einen bestimmten Verwendungszweck optimale Eigenschaft des Stahls wird durch eine definierte Wärmebehandlung erreicht.

*Heat treatment is often used in order to achieve optimum steel properties for a particular application.*

Die wichtigsten Wärmebehandlungsverfahren für Umformteile aus Stahl sind in den folgenden Absätzen beschrieben und in den Abb. 10.2 und 10.3 schematisch dargestellt.

*The most important heat treatment processes for forged parts made of steel are described in the following paragraphs and represented in Fig. 10.2 and Fig. 10.3.*

#### **10.2.1 Normalglühen (N)**

##### ***Normalizing***

Normalglühen oder Normalisieren ist eine Wärmebehandlung, die aus einer Erwärmung des Stahls auf 30° bis 80° oberhalb der Austenitisierungstemperatur und anschließendem langsamen Abkühlen besteht.

*Normalizing is a heat treatment process which involves heating the steel to between 30° and 80° above the austenite temperature, followed by a slow cooling period.*

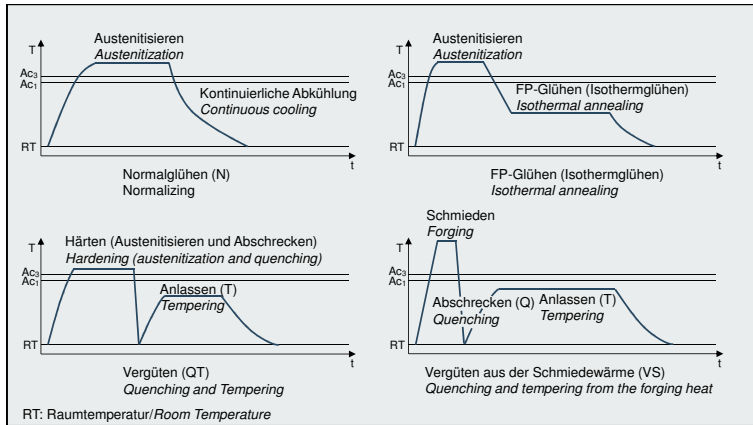


Abb./Fig. 10.2: Schematische Darstellung der Wärmebehandlungsverfahren  
Schematic representation of heat treatment processes

Dieses Verfahren wird angewendet, um bei dafür geeigneten Stählen ein gleichmäßiges und feinkörniges Gefüge aus Ferrit bzw. Perlit zu erreichen. Höher legierte Stähle entwickeln nach einer Normalglühung ein in der Regel technisch nicht gewünschtes Gefüge und müssen FP-geglüht werden.

*This process is used to achieve a homogeneous and fine-grained microstructure of ferrite or pearlite in suitable steels. Higher alloy steels usually develop a less than optimum grain structure following normalizing, rendering isothermal annealing necessary.*

### 10.2.2 FP-Glühen (Isothermglühen) Isothermal Annealing

Das FP-Glühen (FP bedeutet Behandlung auf Ferrit-Perlit-Gefüge) basiert auf einer Austenitisierung sowie dem nachfolgenden raschen Abkühlen bis zur Perlitstufe des Stahls. Die Gefügewandlung in die FP-Struktur findet bei isothermem Halten im Temperaturbereich zwischen ca.  $620^\circ$  und  $680^\circ$  bis zur vollständigen Ferrit-Perlit-Gefügewandlung statt.

*Isothermal annealing is based on austenitization followed by rapid cooling until the pearlite formation temperature is reached. The actual annealing process occurs by means of maintaining the temperature level within a range of between approx.  $620^\circ$  and  $680^\circ$  until a complete ferrite/pearlite structural transformation has taken place.*



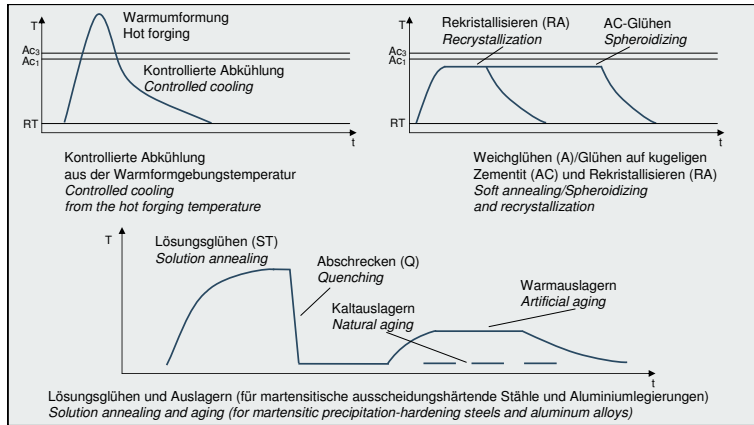


Abb./Fig. 10.3: Schematische Darstellung der Wärmebehandlungsverfahren  
*Schematic representation of heat treatment processes*

Bei mangan-, chrom-, nickel- und/oder molybdänlegierten Einsatz- und Vergütungsstählen wird dieses Verfahren überwiegend angewandt. Neben der Verbesserung der Zerspanbarkeit wird eine Verminderung des Verzugsverhaltens bei anschließendem Einsatzhärten erzielt. Die Beständigkeit gegen Kornwachstum während des Einsatzhärtens sinkt allerdings, wenn FP-Glühungen in der Prozesskette angewendet werden.

*This process is mostly used with case-hardening or heat-treatable steels alloyed with manganese, chromium, nickel and/or molybdenum. Besides improving machinability, a reduction in distortion behavior is also achieved during subsequent case hardening. The resistance to grain growth during case hardening is lowered, however, if isothermal annealing is used in the process chain.*

### 10.2.3 Vergüten (QT) *Quenching and Tempering*

Unter Vergüten (Härten und Anlassen) wird eine rasche Abkühlung aus dem Austenitgebiet verstanden, bei der eine Martensitbildung mit je nach Kohlenstoffgehalt erheblicher Härtesteigerung eintritt. Durch eine nachfolgende Anlassbehandlung wird die gewünschte Härte (in der Regel niedriger als die Ansprunghärte direkt nach dem Härtevorgang) bei gleichzeitig starker Zunahme der Zähigkeit erreicht. Die mechanischen Eigenschaften des Umformteils können somit in weiten Grenzen eingestellt werden.

Je nach Stahlgüte finden unterschiedliche Vorgänge beim Anlassen statt.

Bei niedriglegierten Vergütungsstählen (z. B. C45) wird bei niedrigen Temperaturen angelassen, wobei sich nur die Kohlenstoff-Verspannung im Martensitgitter etwas löst.

Bei höher legierten Vergütungsstählen (z. B. 42CrMo4) wird bei deutlich höheren Temperaturen angelassen. Die sprödigkeitserzeugende Kohlenstoffverspannung des Martensits wird deutlich stärker reduziert. Gleichzeitig bilden sich aber Cr- und Mo-Karbidausscheidungen, die durch Ausscheidungshärtung den Abfall der Martensithärte kompensieren. Dadurch wird in der Summe ein günstigeres Verhältnis von Festigkeit und Duktilität erreicht, was aber durch höhere Legierungskosten erkauft werden muss.

*Quenching and tempering involves rapid cooling from the austenite phase, leading to martensite formation with a considerable increase in hardness, depending on the carbon content. The subsequent tempering process provides the desired hardness (usually lower than the quench hardness directly after the hardening process) with a strong increase in toughness. It is thus possible to influence the mechanical properties of the forged part to a large extent.*

*Depending on the steel grades, different processes are used for tempering.*

*With low-alloy heat-treatable steels (e. g. C45), low annealing temperatures are used. In this case, only the lattice distortion in the martensite structure, which is caused by carbon atoms, is relieved somewhat.*

*In the case of higher alloy heat-treatable steels (e. g. 42CrMo4), considerably higher temperatures are used for annealing. The lattice distortion of carbon atoms in the martensite structure is reduced to a much greater extent, thereby also leading to a decrease in brittleness. At the same time, however, Cr and Mo carbide precipitations form that, as a result of precipitation hardening, compensate for the reduction in martensitic hardness. Overall this leads to a more favorable balance between strength and ductility. The drawback lies in the higher alloy costs.*

### 10.2.4 Vergüten aus der Schmiedewärme (VS) *Quenching and Tempering from the Forging Heat*

Unter bestimmten Voraussetzungen ist das Vergüten aus der Warm- oder Halbwarmformgebungstemperatur möglich. Dabei erfolgt das Härten aus der Schmiedewärme, während das Anlassen auf herkömmliche Weise geschieht. Die erreichten Eigenschaften sind mit denen des normalen Vergütens weitestgehend vergleichbar. Durch den Entfall des separaten Härteprozesses können hier Kosten eingespart werden.

*Quenching and tempering are possible, under certain circumstances, from the hot or warm forging temperature. Quenching takes place from the forging heat, while tempering occurs in the conventional manner. The properties attained from this process are largely comparable to those achieved by normal quenching and tempering. Cost-savings are made due to the omission of a separate hardening process.*

### 10.2.5 Kontrollierte Abkühlung aus der Warmformgebungstemperatur *Controlled Cooling from the Hot Forging Temperature*

Die P-Behandlung (frühere Bezeichnung BY) erfolgt durch eine kontrollierte Abkühlung eines AFP-Stahls (»Stahlwerkstoffe«, siehe Seite 109) aus der Warmformgebungstemperatur.

*P-treatment (previously referred to as BY) refers to controlled cooling of dispersion-hardening steels (»Steel Materials«, see page 109) from the hot forging temperature.*

Durch die kontrollierte Abkühlung wird ein ferritisch-perlitisches Grundgefüge erzeugt. Aufgrund gleichzeitig stattfindender Ausscheidungsvorgänge erfolgt eine Dispersionshärtung im Ferrit, die für die höheren Festigkeiten verantwortlich ist. Unter gewissen Umständen können geringe Anteile von Bainit entstehen. Durch eine P-Behandlung wird eine gute Zerspanbarkeit bei definierter Festigkeit erreicht. Die Festigkeitskennwerte der AFP-Stähle sind nahezu mit Vergütungsstählen vergleichbar. Die Kostenvorteile dieser Wärmebehandlung ergeben sich durch die niedrigen Legierungskosten für die AFP-Stähle und den Wegfall von Härte-, Anlass- und Richtkosten. Ferner werden im Gegensatz zum Vergüten Härterisse vermieden, sodass unter Umständen eine nachfolgende Rissprüfung entfallen kann.

*During the controlled cooling process, a ferritic/pearlitic basic grain structure forms. The precipitation that takes place at the same time causes dispersion hardening to occur in the ferrite, leading to higher strengths. In some cases, traces of bainite are also present. By using P-treatment, it is possible to attain good machinability at a defined strength. The strength values for dispersion-hardening ferritic/pearlitic steels are almost comparable to those for quenched and tempered steels. The financial advantages of such a heat treatment process derive from the low alloy costs of these steels and from the elimination of costs that are usually associated with hardening, tempering and straightening. Moreover, in contrast to quenching and tempering, hardening cracks are avoided, rendering surface inspection for cracks unnecessary in some cases.*

Auch andere Stähle als die AFP-Stähle werden kontrolliert aus der Umformtemperatur abgekühlt, um über alle Bauteile einen gleichmäßigen Zustand für Bearbeitung und Gebrauch (falls keine weitere Wärmebehandlung mehr durchgeführt wird) einzustellen. Hier ist dann aber die Bezeichnung »P-Behandlung« (Precipitation-Treatment = ausscheidungsbildende Behandlung) metallphysikalisch nicht korrekt. Dies wird dann richtigerweise als »kontrollierte Abkühlung« bezeichnet.

*Other steels besides the dispersion-hardening steels undergo controlled cooling from the forging temperature to ensure that all parts have a consistent state for machining and use (if no other heat treatment is to be carried out). In these cases, it is not correct in a microstructural sense to refer to the operation as »P-treatment« (precipitation treatment). Instead, the correct term for this process is »controlled cooling«.*

### 10.2.6 Weichglühen (A)/Glühen auf kugeligen Zementit (AC) *Soft Annealing/Spheroidizing*

Weichglühen ist eine Wärmebehandlung bei einer Temperatur dicht unterhalb der Umwandlungstemperatur zum Austenit mit anschließendem langsamen Abkühlen. Dadurch soll eine möglichst niedrige Härte erzielt werden.

*Soft annealing is a heat treatment process which takes place at a temperature just below the austenitization temperature, followed by slow cooling. This process is used to attain the lowest possible hardness.*

Eine besondere Form des Weichglühens ist das Glühen auf kugeligen Zementit. Es ist verbunden mit längeren Haltezeiten bei Temperaturen, die unter oder um die Austenitisierungstemperatur liegen. Insbesondere bei Stählen mit Kohlenstoffgehalten über 0,5 % und Werkzeugstählen wird das Gefüge in kugelige Karbide mit ferritischer Matrix überführt. Ziel ist es, ein besseres Gefüge für eine nachfolgende mechanische oder thermische Behandlung zu erreichen.

*A special form of soft annealing is spheroidizing, which is associated with longer holding times at temperatures below or around the austenitization temperature. Particularly in the case of steels with a carbon content of above 0.5 % and tool steels, the grain structure is converted into spheroidized carbides in a ferritic matrix. The purpose of this process is to create a better grain structure for subsequent mechanical or thermal processing.*

### 10.2.7 Rekristallisationsglühen (RA) *Recrystallization Annealing*

Die Rekristallisationsglühung findet nach Kaltumformprozessen statt. Durch eine Glühung unterhalb des  $Ac_1$ -Punkts ohne Phasenumwandlung wird die infolge der Kaltumformung eingetretene Verfestigung partiell oder vollständig rückgängig gemacht (siehe auch Kapitel 2.1.3).

*Recrystallization annealing takes place after cold forging processes. By means of annealing (below the  $Ac_1$  point in the iron-carbon diagram, without any phase change taking place), the strain hardening which results from the cold forging process is either partially or fully relieved (see also Chapter 2.1.3).*

### 10.2.8 Wärmebehandlung von austenitischen nichtrostenden Stählen

#### *Heat Treatment of Austenitic Stainless Steels*

Die in den vorherigen Abschnitten beschriebenen Wärmebehandlungsverfahren sind, mit Ausnahme der Rekristallisationsglühung nach Kaltumformung, nicht auf austenitische nichtrostende Stähle anwendbar.

*With the exception of recrystallization annealing following cold forging, the aforementioned heat treatment processes are not suitable for austenitic stainless steels.*

Nach einer Warmumformung werden diese Stähle durch Abschrecken von der Umformtemperatur in den Zustand ihrer besten Korrosionsbeständigkeit und mechanischen Eigenschaften gebracht.

*These steels achieve their optimum corrosion resistance and mechanical properties by quenching them from the hot forging temperature.*

### 10.2.9 Induktivhärten

#### *Induction Hardening*

Die Wärmebehandlungen in den folgenden Abschnitten haben vor allem das Ziel, nur die Eigenschaften der Oberfläche gezielt zu verändern. Je nach Verfahren ergeben sich aber doch auch Veränderungen im Kern des Bauteils (z. B. beim Einsatzhärten).

*The types of heat treatment outlined in the following sections are carried out primarily to change the properties of the surface in a targeted way. Depending on the process, changes may also occur at the core of the component (e. g. during case hardening).*

Beim Induktivhärten (siehe Abb. 10.4) wird nur der hochbelastete Bereich eines Werkstücks gehärtet, z. B. Zahnflanken, Lagersitze, Nocken und Laufflächen. Der Kern bleibt relativ weich und zäh. Eingesetzt wird das Verfahren bei Werkstücken mit der Anforderung an verschleißfeste Oberflächen sowie bei stoßartigen und/oder wechselnden mechanischen Belastungen, z. B. Wälzkontakt.

*During induction hardening (see Fig. 10.4), only the highly stressed region of a workpiece is hardened, e. g. tooth flanks, bearing seats, cams and running surfaces. The core remains relatively soft and tough. The process is used on workpieces that require wear-resistant surfaces as well as on those subjected to impact and/or alternating mechanical loads, e. g. rolling contacts.*

Voraussetzung für das Induktivhärten ist ein Stahl mit mehr als 0,35 Gewichtsprozent Kohlenstoff.

*The prerequisite for induction hardening is a steel with a carbon content of more than 0.35 percent by weight.*

Eine Induktionsspule (siehe Abb. 10.4) erzeugt Wirbelströme in der Oberflächenschicht des Werkstücks. Diese erwärmt sich dann durch Joulesche Wärme auf etwa  $1.100^{\circ}$ . Beim anschließenden Abschrecken mit einem Wasser-Öl-Gemisch entsteht eine sehr harte und verschleißfeste Martensitschicht.

*An induction coil (see Fig. 10.4) generates eddy currents in the surface layer of the workpiece. Joule heating then causes this surface layer to reach a temperature of around  $1,100^{\circ}$ . During subsequent quenching using a water-oil mixture, a very hard and wear-resistant martensite layer forms.*

Da nur die Randschicht des Werkstücks erhitzt wird, ist eine hohe Maßhaltigkeit gegeben. Des Weiteren ist die Zunderbildung aufgrund der kurzen Zeit auf hoher Temperatur vergleichsweise gering. Oft werden die Werkstücke nach dem Härten noch hartbearbeitet, um die gewünschte Oberflächengüte zu erreichen. Ein Beispiel für ein induktiv gehärtetes Bauteil ist die wälzgelagerte Ausgleichswelle (siehe Abb. 4.5, unten Mitte).

*As only the surface layer of the workpiece is heated, a high level of dimensional accuracy results. Furthermore, scale formation is comparatively low due to the elevated temperature being applied only for a brief time. The workpieces are often hard machined following hardening in order to achieve the desired surface quality. An example of an induction hardened component is the balancer shaft, with roller bearings (see Fig. 4.5, lower center).*

### 10.2.10 Einsatzhärten Case Hardening

Unter Einsatzhärten versteht man das randnahe Aufkohlen, Härten und Anlassen eines Werkstücks aus Stahl.

*Case hardening refers to the carburizing, hardening and tempering of the surface zone of a steel workpiece.*

Beim Aufkohlen wird die Randschicht des Werkstücks durch Glühen bei ca.  $900 - 970^{\circ}$  in einer geregelten kohlenstoffhaltigen Gasatmosphäre auf einen Kohlenstoffgehalt von 0,5 - 0,85 % (C-Gehalt) angereichert. Nach dem Aufkohlen ist die Randschicht somit härter.

*During carburizing, the surface layer of the workpiece is enriched with carbon to between 0.5 and 0.85 % (C content) by means of annealing at approx.  $900 - 970^{\circ}$  in a controlled carbon-rich gas atmosphere. After carburizing, the surface zone is ready for hardening.*

Danach erfolgt ein Härten (Abschrecken), z. B. in Öl, mit anschließendem Anlassen bei ca.  $200^{\circ}$ .

*A hardening process (quenching), e. g. in oil, follows before tempering is carried out at approx.  $200^{\circ}$ .*

Bereiche, die am Bauteil nicht einsatzgehärtet werden sollen, müssen zuvor mit einer hitzebeständigen Paste, z. B. Kupferpaste, abgedeckt werden.

*Regions of the part that should not be case-hardened must be covered beforehand using a heat-resistant paste, e. g. copper paste.*

Das Einsatzhärten gewährleistet eine harte, verschleißfeste Oberfläche (45 - 65 HRC) und einen zähen Kern. Einsatzgehärtet werden zum Beispiel Zahnräder oder Getriebewellen.

*Case hardening guarantees a hard, wear-resistant surface (45 - 65 HRC) and a tough core. Examples of case-hardened parts include gears and transmission shafts.*

Durch die Oberflächenhärtung werden Druckeigen-  
spannungen in der Oberfläche erzeugt, da der auf-  
gekohlte Martensit am Rand eine größere Volumen-  
zunahme während des Härtens erfährt als der Kern.  
Dadurch wird die Dauerwechselfestigkeit der Teile  
deutlich verbessert. Die Druckeigen-  
spannungen wirken den Zugspannungen bei Biege- oder Torsions-  
belastung entgegen, weshalb ein Anriss erst bei hö-  
heren Spannungen auftritt und/oder ein bestehender  
Riss am Wachstum gehemmt wird.

*Surface hardening generates compressive residual stresses in the surface, as the carburized martensite at the rim undergoes a greater increase in volume during hardening than the core. This leads to a considerable improvement in the fatigue strength of the parts. The compressive residual stresses counteract the tensile stresses during bending and torsional loads, causing initial cracking to occur only at higher levels of stress and/or hindering the proliferation of an existing crack.*

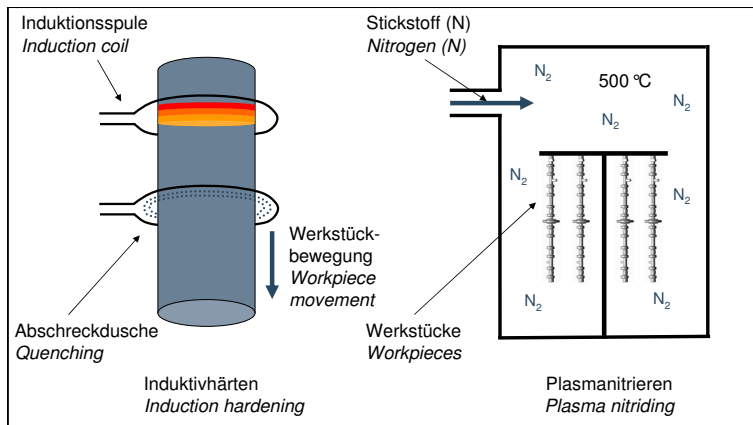


Abb./Fig. 10.4: Oberflächenbehandlung  
*Surface treatment*

### 10.2.11 Plasmanitrieren *Plasma Nitriding*

Das Plasmanitrieren (siehe Abb. 10.4) ist ein thermochemisches Verfahren zur Oberflächenhärtung.

Die Härtesteigerung beruht nicht auf Martensitbildung, sondern auf der Bildung äußerst harter Stickstoffverbindungen in der Randschicht des Werkstücks sowie in tieferen Bereichen auf einer Dispersions- und Mischkristallverfestigung durch Nitride und eingelagerten Stickstoff.

Im Nitrierofen diffundiert Stickstoff bei  $500^{\circ}$  -  $550^{\circ}$  in den Stahl und bildet Nitride mit den Legierungselementen und mit dem Eisen.

Es entsteht eine sehr harte, verschleißfeste und tribologisch günstige Oberfläche, wobei der Werkstückkern bis auf etwaige Anlassvorgänge unverändert bleibt. Beim Plasmanitrieren entsteht nur sehr wenig Verzug und Aufmaßveränderung, da keine Phasenumwandlungen auftreten und die Bauteile am Ende des Vorgangs nicht abgeschreckt werden müssen. Die Bauteile können oftmals direkt auf das Endmaß gefertigt werden. Zudem bietet die Plasmanitrierschicht einen gewissen Korrosionsschutz.

### 10.2.12 Festigkeitsstrahlen *Shot Peening*

Das Festigkeitsstrahlen ist kein Wärmebehandlungsverfahren, soll aber an dieser Stelle zur Abrundung der oberflächeneinstellenden Behandlungen genannt werden. Tatsächlich erfolgt das Festigkeitsstrahlen in zunehmendem Maß nach dem Einsatzhärten.

*Plasma nitriding (see Fig.10.4) is a thermochemical process for surface hardening.*

*The increase in hardness is not based on martensite formation but on the generation of extremely hard nitride in the surface zone of the workpiece, as well as on dispersion and mixed crystal hardening in the deeper regions due to nitrides and embedded nitrogen.*

*In the nitriding furnace, nitrogen diffuses into the steel at  $500^{\circ}$  -  $550^{\circ}$ , thereby forming nitrides with the alloying elements and with iron.*

*A very hard, wear-resistant and tribologically favorable surface is generated, while the workpiece core remains unchanged aside from any tempering processes. During plasma nitriding only very little distortion and changes to the machining allowance occur, as no phase transformations take place and the parts do not need to be quenched at the end of the process. The parts can often be produced directly with the final dimensions. In addition, the plasma nitriding layer provides a certain level of corrosion protection.*

*Although shot peening is not a heat treatment process, it still deserves a mention here as a surface treatment. Shot peening is being used increasingly following case hardening.*



Beim Festigkeitsstrahlen werden Stahlkörner mit hoher Geschwindigkeit auf die Werkstückoberfläche gestrahlt, wodurch die Oberfläche eine Kaltverfestigung erfährt. Durch die beim Auftreffen der Körner entstehende inhomogene Verformung entsteht in der Randschicht ein Druckeigenspannungszustand. Durch Festigkeitsstrahlen wird die Bauteilfestigkeit, die Verschleißfestigkeit und die Beständigkeit gegen Spannungsrisskorrosion sowie vor allem die Dauerwechselfestigkeit erhöht.

*Shot peening involves steel grains being blasted at high speed onto the workpiece surface, causing the surface to undergo strain hardening. The inhomogeneous deformation caused by the impact of the grains leads to compressive residual stress in the surface. Shot peening increases part strength, wear strength, resistance to stress crack corrosion and, above all, it improves fatigue strength.*

### 10.3 Wärmebehandlung von Umformteilen aus Aluminium *Heat Treatment of Forged Aluminum Parts*

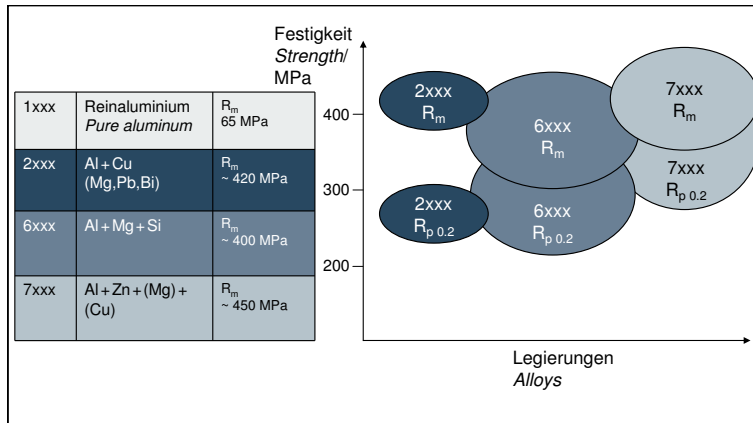


Abb./Fig. 10.5: Aluminiumlegierungen  
*Aluminum alloys*

Aushärtbare Aluminiumlegierungen erhalten ihre Festigkeit durch die Schritte Lösungsglühen, Abschrecken, Auslagern (siehe Abb. 10.3).

*Age-hardenable aluminum alloys attain their strength by undergoing solution annealing, quenching and aging (see Fig. 10.3).*

Die Umformteile werden bei Temperaturen um  $500^{\circ}$  lösungsgeglüht und danach abgeschreckt. Anschließend werden die Teile je nach Legierung bei Raumtemperatur oder erhöhter Temperatur ausgelagert. Erfolgt die Auslagerung bei Raumtemperatur, dann bezeichnet man diesen Vorgang als Kaltauslagerung. Erfolgt sie bei erhöhter Temperatur (ca.  $100^{\circ}$  bis  $200^{\circ}$ ), wird dies Warmauslagerung genannt.

*The forged parts are solution-annealed at temperatures of around  $500^{\circ}$  and then quenched. Following this, the parts then undergo aging, either at room temperature or at elevated temperatures, depending on the alloying elements. If aging occurs at room temperature, the process is known as natural aging, whereas if it takes place at an elevated temperature (approx.  $100^{\circ}$  to  $200^{\circ}$ ), it is termed artificial aging.*

Die für den Automobilbau typischen Legierungen der 6000er-Gruppen werden warm ausgelagert (unterschiedliche Legierungsgruppen siehe Abb. 10.5).

*The alloys of the 6000 series that are typically used in automotive construction undergo artificial aging (for the different alloying groups see Fig. 10.5).*

# 11 Qualitätsmanagement

## *Quality Management*

Im Rahmen des wachsenden Wettbewerbs auf den nationalen und internationalen Märkten wird es für Unternehmen immer wichtiger, qualitativ hochwertige Produkte bei niedrigen Kosten zur richtigen Zeit zu liefern.

*Against the backdrop of growing competition on national and international markets, it is becoming increasingly important for companies to supply high-quality products at low costs at the right time.*

Die Sicherung der Qualität ist dabei allumfassend; sie beginnt beim Marketingbereich und reicht von der Forschung, der Entwicklung, über die Materialwirtschaft, Produktion und den Kundendienst. Es geht darum, Produkte zu entwickeln und zu liefern, die den Kunden über lange Zeit durch ihre Leistungen zufrieden stellen.

*Assuring quality is an all-encompassing task, covering marketing, research and development, materials management, production, and customer services. The aim is to develop and supply products whose performance generates customer satisfaction over a long period of time.*

### 11.1 Managementsystem

#### *Management System*

Ein guter Ansatz ist ein Integriertes Management-Handbuch (Qualität, Umwelt und Arbeitssicherheit), das die Führungs-, Geschäfts- und unterstützenden Prozesse im Unternehmen dokumentiert. Mittels Prozessbeschreibungen werden diese bezüglich ihrem Input und Output weitergehend spezifiziert. Die Messung der Leistungsfähigkeit (Effektivität und Effizienz) der Prozesse erfolgt anhand definierter Kennzahlen.

*An Integrated Management Handbook is a sound approach (quality, environment, occupational health and safety). It documents management, operational and supporting processes in a company. Process descriptions are used to specify these processes in more detail with respect to their input and output. The measurement of performance (effectivity and efficiency) of the processes is carried out using defined key figures.*

Ein Managementsystem gewährleistet, dass die organisatorischen, kaufmännischen und technischen Tätigkeiten, die Auswirkungen auf die Ausführungsqualität haben, geplant, gesteuert und überwacht werden und deren vertraglich vereinbarte Anforderungen eingehalten werden.

*A management system guarantees that the organizational, commercial and technical activities that have an effect on quality performance can be planned, controlled and monitored. It also ensures that requirements that have been contractually agreed upon are observed.*

## 11.2 Gewährleistung der Produktqualität

### *Product Quality Assurance*

Für stark beanspruchte Bauteile eignen sich Umformteile nicht zuletzt wegen ihrer anerkannt hohen Qualität. Mit dem Qualitätsmanagement (QM) lassen sich die positiven Eigenschaften des Umformteils zuverlässig gewährleisten.

*The recognized high-quality of forgings render them suitable for parts subjected to high loads. With quality management (QM), the advantageous properties of the forged part can be guaranteed in a reliable way.*

Wichtige qualitätssichernde Maßnahmen sind die Produkt-/Qualitätsvorausplanung, die Erstellung eines Produktionslenkungsplan (Control Plan), die Herstellbarkeitsbewertung, Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (siehe Abschnitt 11.2.1 FMEA) und die statistische Prozessregelung (siehe Abschnitt 11.2.2 SPC).

*Important quality assurance measures include advance product/quality planning, the drawing up of a production control plan, feasibility studies, the Failure Mode and Effects Analysis (see section 11.2.1 FMEA), and statistical process control (see section 11.2.2 SPC).*

Die Herstellung von Umformteilen auf modernen Maschinen ist ein gut reproduzierbarer Vorgang. Die Prozessüberwachung während der Produktion erfolgt durch die Überprüfung von Prozess- sowie Produktmerkmalen; das sind z. B. fertigungsabhängige Bauteilmaße, die Umformtemperatur und die Umformkraft. Neben der maßlichen Genauigkeit müssen Umformteile auch einwandfreie Oberflächen und gleichbleibende Werkstoffeigenschaften aufweisen.

*The forging of parts using modern machinery is a highly repeatable process. Process control is performed during production through regular quality checks of process parameters and product features. These include production-dependent dimensions, the forging temperature and the force needed for the forging process. Aside from dimensional accuracy, the forged parts must also have surfaces that are free from defects, and they must display consistent material properties.*

Mit elektromagnetischen Rissprüfgeräten, Wirbelstromprüfeinrichtungen, Ultraschallprüfanlagen sowie einem metallografisch ausgestatteten Labor lassen sich diese Eigenschaften zuverlässig absichern.

*These properties can be guaranteed by means of electromagnetic crack detection, eddy current testing, ultrasonic testing, as well as in laboratories equipped to carry out metallographic tests.*

### 11.2.1 FMEA

Mit dem Instrument der FMEA werden während der Produktentwicklung, der Produktionsvorbereitung und der Qualitätsplanung mögliche Ursachen für Qualitätsmängel identifiziert, in ihrer Auswirkung beurteilt und Präventivmaßnahmen zu ihrer Verhinderung festgelegt.

*The FMEA instrument is used during product development, product preparation and quality planning to identify the possible causes of quality shortcomings, to estimate the effects thereof and to establish preventive measures to avoid them.*

Bei massivumgeformten Komponenten finden in diesem Zusammenhang Überlegungen zum Materialfluss, Abfolge der Fertigungsschritte, Auslegung der Werkzeuge und Einsatz von Prüf- und Überwachungsmethoden besondere Beachtung.

*Aspects that receive particular attention with respect to forged parts include material flow, the appropriate sequence of production steps, tool design and the use of inspection and control methods.*

### 11.2.2 Statistische Prozessmethoden *Statistical Process Control (SPC)*

In allen Phasen der Herstellung wird die statistische Prozessregelung (SPC) zur Überwachung und Auswertung von qualitätsrelevanten Merkmalen angewendet. Dies ist eine entscheidende Voraussetzung zum Erzielen einer gleichbleibenden Produktqualität und der Einhaltung der Herstellbedingungen.

*Statistical Process Control (SPC) is used in all phases of manufacture to monitor and evaluate characteristics that are relevant to quality considerations. This is a decisive prerequisite in achieving consistent product quality and observing optimum production conditions.*

So werden Streueinflüsse von der Maschine und dem Prozess eindeutig erkannt und geregelt. Durch Prüfmittelfähigkeitsuntersuchungen wird gewährleistet, dass nur geeignete Messmittel in der Produktionsüberwachung eingesetzt werden.

*Scatter from machinery and processes are thereby clearly identified and controlled. Gage Capability Studies (GCS) ensure that only suitable measuring equipment is employed during production monitoring.*

# 12 Moderne Entwicklungsmethoden

## Modern Development Methods

Die simultane Entwicklung eines Bauteils bzw. Systems durch Lieferanten und Abnehmer (Simultaneous Engineering) bietet für beide Seiten, Lieferanten wie Kunden, Vorteile im Hinblick auf Entwicklungsdauer und -qualität sowie Kosten der Komponente.

*The simultaneous development of a component or a system by the supplier and the customer (Simultaneous Engineering) holds benefits for both parties with respect to the development period and quality as well as to the costs of the components.*

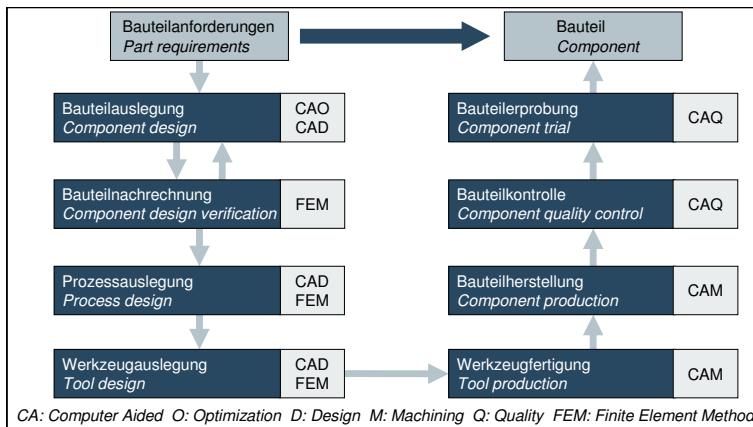


Abb./Fig. 12.1: Prozesskette der Entwicklung von Massivumformteilen  
*Process chain in the development of forged parts*

Optimale Voraussetzungen für diesen Prozess ergeben sich, wenn auch der Lieferant eine hohe Entwicklungskompetenz besitzt. Die Nutzung moderner Entwicklungs- und Simulationswerkzeuge und die Integration dieser Werkzeuge in die Entwicklungskette des Abnehmers sind dann möglich. Hierbei stehen insbesondere Tools zur Bauteilbeschreibung und -auslegung im Vordergrund.

*It is particularly advantageous if the supplier also has a high level of development competence. The use of modern development and simulation tools, as well as the integration of these tools into the customer's development chain, must be assured. Of particular importance are tools for component design.*

Die Entwicklungskette (Abb. 12.1) muss durchgängig sein und auch die Auslegung des Herstellungsprozesses inklusive Auswahl des Werkstoffs beim Lieferanten mit beinhalten, da nur so ein zeit-, kosten- und qualitätsoptimiertes Entwicklungsergebnis realisiert werden kann.

*The development chain (Fig. 12.1) must be continuous and also include the supplier's production sequence including material selection, as it is only by doing this that a timely, cost-efficient and high quality development result can be attained.*

## 12.1 Simultaneous Engineering

### *Simultaneous Engineering*

Die Anwendung des Simultaneous Engineering, die gemeinsam und parallel bei Abnehmer und Lieferant durchgeführte Bauteilentwicklung, ist mittlerweile selbstverständlich geworden. Beide Partner können hierbei profitieren. Zum einen lässt sich die Entwicklungszeit reduzieren, zum anderen kann durch frühzeitige Berücksichtigung der fertigungstechnischen Möglichkeiten ein in Bezug auf Bauraum und Kosten optimales Teil entwickelt werden.

*The use of Simultaneous Engineering, i. e. component development that is carried out in cooperation between the customer and the supplier, has become a matter of course, and both partners can profit from it. One benefit is the reduction in development time; another lies in the early consideration of production possibilities, leading to the development of an optimum part with respect to construction space and costs.*

Ein Simultaneous-Engineering-Prozess ist heute ohne durchgängige CAD-Kette nicht mehr vorstellbar. Es werden sowohl auf der Seite der Abnehmer als auch auf der Seite der Lieferanten volumenbasierende Systeme eingesetzt, die nicht nur die Oberfläche eines Bauteils beschreiben, sondern auch das Volumen des Bauteils kennen. Die Systeme verfügen über die Möglichkeit der parametrischen Modellierung, mit deren Hilfe Bauteile, Baugruppen und Systeme dreidimensional im Rechner beschrieben werden können.

*A continuous CAD chain has become indispensable in Simultaneous Engineering processes. Today, both customer and supplier rely primarily on solid model based systems that not only represent the surface of a component, but also recognize the volume of the part. Such systems enable parametric modeling to be carried out, which assists in creating 3-D computer representations of components, assemblies and systems.*

### 12.1.1 Datenaustausch zwischen Lieferant und Abnehmer *Data Exchange Between Supplier and Customer*

Der Datenaustausch zwischen unterschiedlichen CAD-Systemen erfolgt auf der Basis neutraler Schnittstellenformate. Von Bedeutung sind hier die IGES-Schnittstelle (Initial Graphical Exchange Specification) zum Austausch von Geometrie- und Zeichnungsinformationen sowie die STEP-Norm (Standard for the Exchange of Product Model Data) ISO 10303. Der erreichte Leistungsumfang der STEP-Schnittstelle stellt eine gute Alternative zu den bisher gängigen Schnittstellen dar, wobei der Austausch von Volumenmodellen ausschließlich mithilfe von STEP möglich ist.

*Data exchange between different CAD systems occurs on the basis of neutral interface formats. Worthy of particular mention are the IGES interface (Initial Graphical Exchange Specification) for exchanging geometry and drawing information, as well as the STEP norm (Standard for the Exchange of Product Model Data), ISO 10303. The scope offered by the STEP interface represents a good alternative to the interfaces that have been commonly used to date, since it includes standards for solid model exchange.*

Lieferant und Abnehmer müssen nicht nur bestimmte technische Voraussetzungen erfüllen, sondern sich auch über Inhalt, Umfang und Detaillierungsgrad der Daten abstimmen. Damit wird einerseits der Aufwand begrenzt, andererseits kann ohne Verluste auf den zur Verfügung gestellten Daten aufgesetzt werden.

*Supplier and customer thus need to not only coordinate certain technical requirements, but must also agree on the content, scope and detail of the data. It is only then that unnecessary work is avoided and all data can be used fully without any losses.*

### 12.1.2 Durchgängige CAD/CAM-Kette *Continuous CAD/CAM Chain*

Die Durchgängigkeit der Daten zwischen Lieferanten und Abnehmer muss bis zur Fertigung der benötigten Umformwerkzeuge gewährleistet sein; nur dann können diese kostengünstig und fehlerfrei in kürzester Zeit hergestellt werden.

*The consistency of data between the supplier and the customer must be guaranteed right through to the production of the required forging tools. This ensures that these tools can be produced in a cost-efficient and fault-free way in the shortest possible time.*

Im Einbauraum der verwendeten Maschine bilden die Umformwerkzeuge das für den Umformprozess notwendige Gesamtwerkzeug. Die für die Fertigung relevanten Zeichnungen werden aus den entsprechenden Modellen abgeleitet (siehe Abb. 12.2).

*The forging tools in the machine represent the entire tooling that is required for the forging process. The drawings relevant to production are derived from the corresponding models (see Fig. 12.2).*



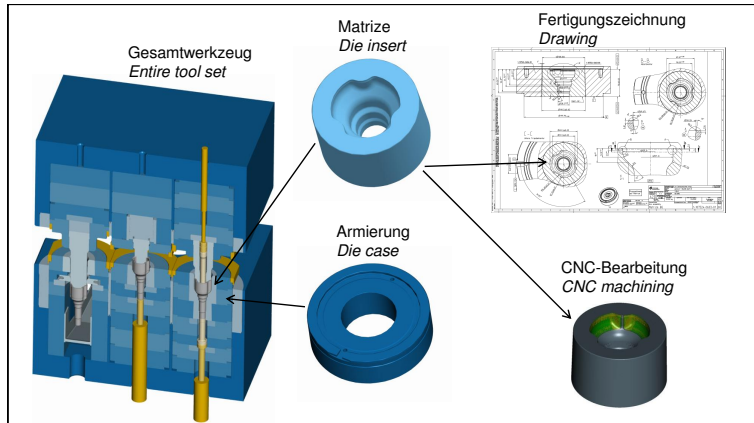


Abb./Fig. 12.2: Assoziative Verknüpfung von Werkzeugeinzelteilen, zugehörigen Zeichnungen und NC-Programmen  
*Associative relationship of individual tool parts, corresponding drawings and NC programs*

Die heute in der Regel auf CNC-Maschinen gefertigten Werkzeuge können häufig ohne Nacharbeit eingesetzt werden. Die notwendigen NC-Programme werden aus der CAD-Geometrie abgeleitet und mit dieser verknüpft, sodass sich bei Änderungen an der Ausgangsgeometrie auch die Bearbeitungsprogramme entsprechend regenerieren.

*Tools that are usually produced today on CNC machines can often be used without the need for further finishing. The necessary NC programs are derived from the CAD geometry and linked to this, so that upon changes being made to the starting geometry, the CNC programs regenerate.*

Für die Qualitätssicherung eingesetzte CAQ-Systeme und Koordinatenmessgeräte greifen entweder direkt auf die CAD-Daten zu oder können ebenfalls mit entsprechend abgeleiteten Steuerprogrammen versorgt werden.

*The CAQ and the coordinate measuring machine systems employed for quality control either access the CAD data directly or they are supplied by appropriately derived control programs.*

## 12.2 Einsatz von FEM-Systemen

### *Use of FEM Systems*

Die FEM (Finite-Elemente-Methode) ist eine sehr leistungsstarke Methode zur Lösung zahlreicher Entwicklungsaufgaben. Anwendungen zur Strukturanalyse waren die ersten Anwendungen der FEM. Mit steigender Rechnerleistung entstanden FEM-Pakete, die eine automatische Optimierung eines Bauteils durchführten.

*FEM (Finite Element Method) is a high-performance method for solving several development tasks. FEM was first applied in the area of structural analysis. As computer performance increased, FEM packages were created that carried out automatic optimization of a part.*

Weitere Steigerungen der Rechenkapazität erlaubten dann sogar die Simulation von Fertigungsprozessen wie z. B. der Massivumformung, in der zahlreiche inkrementelle Rechenschritte den Gesamtverlauf eines Prozesses abbilden.

*Further increases in computing capacity then led to FEM being used for simulating production processes, such as forging. During such simulations, several incremental calculations model the entire process.*

### 12.2.1 Einsatz von FEM zur Bauteilgenerierung und -optimierung

#### *Implementation of FEM for Component Design and Optimization*

In einer Topologieoptimierung wird die Grobgestalt eines Bauteils durch eine automatische Optimierung generiert.

*Topology optimization involves automatically generating the rough design of a component.*

Es wird zunächst der maximale Bauraum modelliert. Dann werden Belastungen und weitere Randbedingungen definiert. In einer iterativen Vorgehensweise entfernt die Topologieoptimierungssoftware dann die Bauteilbereiche, die nur geringe Belastungen sehen oder nur wenig zur Steifigkeit des Bauteils beitragen.

*Firstly, the maximum construction space is modeled before the loads and other boundary conditions are defined. In an iterative procedure the topology optimization software then removes those areas of material where the stresses are lower or those regions that contribute little to the stiffness of the part.*

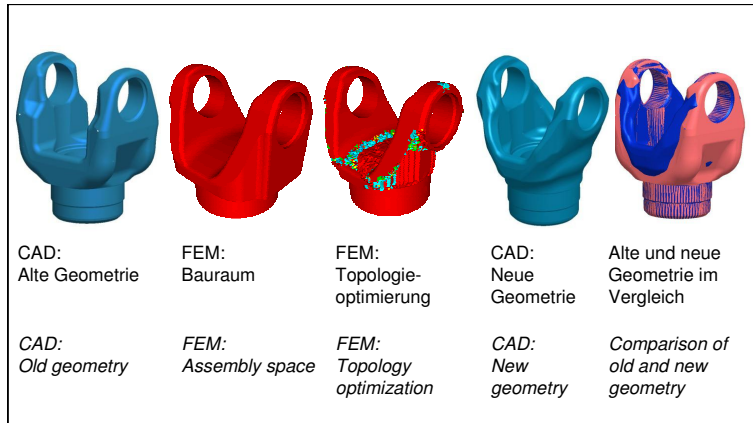


Abb./Fig. 12.3: Topologieoptimierung  
*Topology optimization*

Das so erzielte Modell (siehe Abb. 12.3) dient als Ideenlieferant für die Bauteilgeometrie. Bei der anschließenden Bauteilbeschreibung sind die Möglichkeiten und Grenzen (z. B. Entformbarkeit) des eingesetzten Fertigungsverfahrens entsprechend zu berücksichtigen. Das so entstandene Modell kann dann mithilfe einer Gestaltoptimierung (siehe Abb. 12.4) weiter spannungsoptimiert werden.

*The model that is generated (see Fig. 12.3) serves as a source of ideas for part geometry. The subsequent component layout needs to consider the possibilities and limitations (e. g. removal of the part) posed by the production process that is to be used. The model can then be further enhanced with respect to stress by using shape optimization (see Fig. 12.4).*

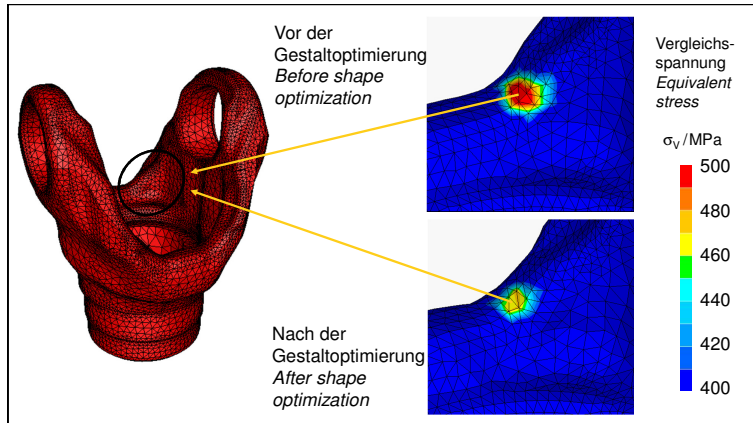


Abb./Fig. 12.4: Gestaltoptimierung  
Shape optimization

### 12.2.2 Linear-elastische FEM-Berechnung eines Bauteils *Linear-Elastic FEM Calculation of a Part*

Die Bauteilgeometrie, die aus dem CAD-System übernommen wird, ist Ausgangspunkt für die Berechnung. Das Modell berücksichtigt alle Lastfälle, die den später in der Realität zu erwartenden Belastungen entsprechen. Bei hinreichend genau beschriebener Geometrie und geeigneter Vernetzung der Geometrie für die FEM-Analyse können hiermit die Spannungen an jeder Stelle des Bauteils mit guter Genauigkeit ermittelt werden.

*The geometry of a component, which is taken from the CAD system, forms the starting point for the calculation. During this process, all external forces, corresponding to the loads to be expected during application, need to be considered. As long as the geometry is precisely represented and suitably meshed for the FEM analysis, it is possible to derive the stresses at every location of the component with a high level of accuracy.*

Die Interpretation der Berechnungsergebnisse wird durch die grafische Darstellung, z. B. der Spannungsverteilung (Abb. 12.5) oder der Verformung, erleichtert.

*Interpreting the calculation results is made easier by graphic representation e. g. stress distribution (Fig. 12.5) or deformation.*

Vielfach wird von der FEM-Berechnung auch ein Dauer- oder Betriebsfestigkeitsnachweis erwartet.

*Verification of fatigue strength or service strength is also often demanded of FEM calculations.*

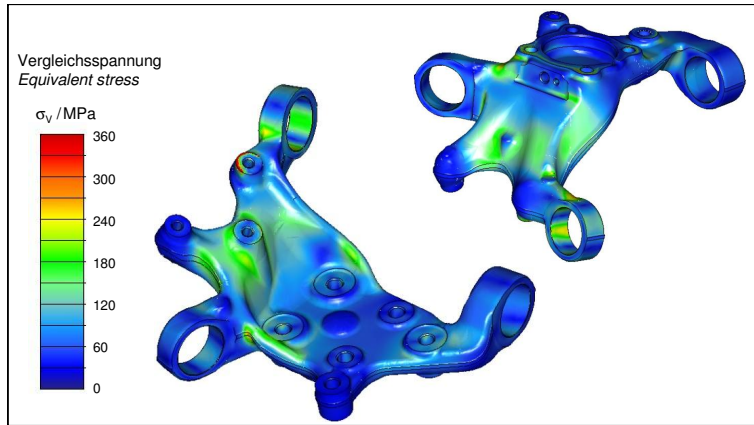


Abb./Fig. 12.5: Beispiel der Bauteilauslegung durch FEM-Berechnungen  
*Example of component design with FEM analysis*

Hierbei ist zu berücksichtigen, dass die entsprechenden Materialkennwerte vorliegen müssen. Insbesondere dürfen der Einfluss des Herstellverfahrens, bauteilabhängige, lokale Unterschiede der Bauteileigenschaften sowie die realen Oberflächeneigenschaften eines Bauteils nicht unberücksichtigt bleiben.

*In this case, the appropriate material characteristics need to be available. It is of particular importance that the influencing factors of the production process on these material properties are taken into account, along with any component-dependent, local differences in the component properties, and the actual surface characteristics of the part.*

Liegen bereits Untersuchungsergebnisse von ähnlichen Bauteilen vor, kann die FEM-Analyse gesicherte Aussagen liefern, die es erlauben, die Entwicklungszeit deutlich zu verkürzen und die Anzahl an aufwendigen Lebensdauertests zu reduzieren. Gleichzeitig können die Möglichkeiten des eingesetzten Werkstoffs und des jeweiligen Herstellverfahrens bestmöglich ausgenutzt und damit ein kostenoptimiertes Bauteil mit minimalem Gewicht ausgelegt werden.

*If findings from similar components are available, the FEM analysis is able to deliver reliable information, significantly reducing development time and the number of practical lifecycle tests that need to be performed. Another benefit lies in the ability to exploit the possibilities offered by the materials and production processes in order to design a cost-efficient component.*

### 12.2.3 Einsatz der FEM zur Prozesssimulation *Implementation of FEM for Process Simulation*

Ebenso wichtig wie die optimale Bauteilauslegung ist auch die optimale konstruktive Auslegung des Fertigungsprozesses. Auch hier kann die FEM inzwischen eingesetzt werden.

*The optimum design of the production process is just as important as optimum component design. FEM can be used now in this area, too.*

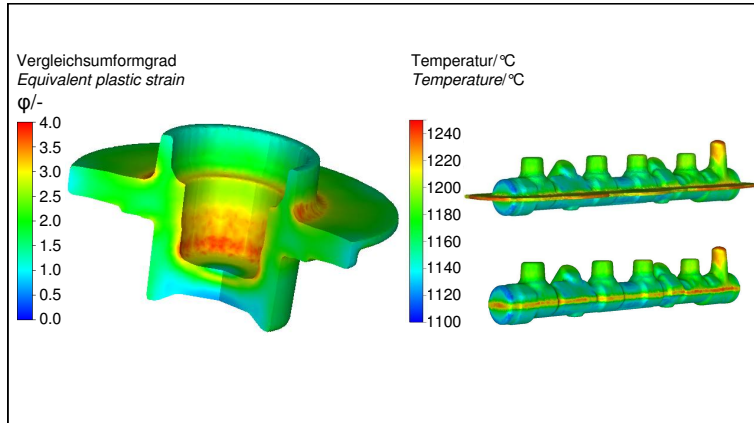


Abb./Fig. 12.6: Ergebnisplot von Stoffflusssimulationen  
*Results plot of a material flow simulation*

In der Simulation eines Massivumformprozesses wird das Bauteil als Volumenkörper vernetzt, die Werkzeuge meist nur als Oberflächennetz.

*When simulating a forging process, the part is meshed as a solid; the tools are simulated in most cases only as a surface mesh.*

Dann werden die Werkzeuge inkrementell bewegt, so wie es der Kinematik der zu modellierenden Umformpresse entspricht.

*The tools are then moved incrementally in a way that corresponds to the kinematics of the forging press to be modeled.*

In jedem Zeitschritt wird dann auf Basis der plastomechanischen Grundgleichungen die Umformung des Werkstücks berechnet. Dabei werden mechanische und thermische Werkstoffeigenschaften berücksichtigt.

*During each time increment, the forging of the workpiece is calculated on the basis of plastomechanical basic equations, taking into account mechanical and thermal material properties.*

Ebenso berücksichtigt wird die Reibung zwischen Werkstück und Werkzeug und die Entstehung und Dissipation von Wärme, sodass der reale Umformvorgang in allen seiner physikalischen Teilvorgänge möglichst realitätsgetreu wiedergegeben wird.

*Other aspects that are considered include the friction between the workpiece and the tool as well as the generation and dissipation of heat. In this way, the simulation models the real forging process in all its physical sub-processes as accurately as possible.*

Ziel der Prozesssimulation (siehe Abb. 12.6) ist die fehlerfreie Umformung (Vermeidung von Unterfüllungen und Falten).

*The aim of process simulation (see Fig. 12.6) is error-free forging (avoiding underfilling and folds).*

Weitere Ziele können je nach Anwendungsfall sein: Minimierung der Werkzeugbelastung, Verringerung des Gratanteils, Vorhersage der Gefahr eines duktilen Bruchs des Werkstücks in der Kaltumformung, Vorhersage des Faserverlaufs und die Beantwortung vieler anderer umformtechnischer Fragestellungen.

*Depending on the application, other objectives may be to minimize tool load, reduce flash, predict the risk of ductile fracture in the workpiece during cold forging, predict the fiber flow, and to address many other forging issues.*

### **12.3 Rapid Prototyping** ***Rapid Prototyping***

Im Entwicklungsprozess ist es wünschenswert, kurzfristig mit möglichst geringem Aufwand erste Musterteile erzeugen zu können. Hierzu werden beispielsweise Verfahren wie die Stereolithografie eingesetzt, mit deren Hilfe, aufbauend auf der CAD-Geometrie, Bauteile überwiegend aus Kunststoffen, seltener aus Metallen hergestellt werden können.

*During the development process, it is an advantage to be able to produce sample parts at short notice and with a minimum of effort. Processes such as stereo lithography may be used for such purposes. This assists in producing plastic and, less often, metal components based on CAD geometries.*

Diese Bauteile erreichen aber nie die Festigkeitseigenschaften, die durch Umformung hergestellte Bauteile aufweisen.

*These components never attain the strength properties of those produced by metal forging, however.*

Im Bereich der Massivumformung werden für die Erstellung erster Musterteile, die den späteren Bauteileigenschaften möglichst nahe kommen sollen, im Wesentlichen spanende Verfahren eingesetzt, wobei z. B. freiformgeschmiedete Blöcke aus Stahl oder Aluminium verwendet werden.

Eine weitere Möglichkeit besteht darin, durch eine Vereinfachung der Umformgeometrie und anschließender aufwendigerer spanender Bearbeitung einzelne Umformstufen einzusparen und somit die Prozesskette der umformtechnischen Bauteilherstellung deutlich zu reduzieren. Gleichzeitig lässt sich auch durch die direkte Herstellung vereinfachter Werkzeugprototypen der Werkzeugaufwand senken.

Im Vergleich zu den Bauteilen, die mit Verfahren der Stereolithografie hergestellt werden, weisen die so gefertigten Bauteile Eigenschaften auf, die sich nur noch wenig vom späteren Serienbauteil unterscheiden. Für eine kleine Anzahl an Prototypen kann dies die wirtschaftlichste und schnellste Alternative sein, wobei für die Serie dann noch einmal entwickelt werden muss.

## 12.4 Rasterelektronenmikroskop (REM) *Scanning Electron Microscope (SEM)*

Im Raster-Elektronenmikroskop (siehe Abb. 12.7) wird mit einem sehr dünnen Elektronenstrahl (Durchmesser ca.  $0,01\ \mu\text{m}$ ) die Probenoberfläche zeilenförmig abgetastet (gerastert). Durch das Auftreffen der Primärelektronen des Elektronenstrahls werden aus der Probe Sekundärelektronen herausgelöst, die von einem Elektronendetektor aufgefangen werden. Nach elektronischer Verstärkung wird die örtliche Verteilung der Sekundärelektronen auf einem Bildschirm wiedergegeben.

*In the area of forging, initial sample parts, which should represent the later component properties as closely as possible, are mostly produced by machining processes. For these processes, open-die forged blocks made of steel or aluminum may be used, for example*

*Another option is to leave out some forging stages by simplifying the geometry of the forged part and the subsequent machining process, thereby significantly reducing the metal forging production chain. Likewise, the direct production of simplified tool prototypes leads to a considerable reduction in tool effort.*

*In contrast to components produced by stereo lithography, the components generated in this way display properties which differ only slightly from those in real series production. For a small number of prototypes, this can be the most cost-efficient and fastest alternative. However, renewed development efforts are then necessary for series production.*

*The scanning electron microscope (see Fig. 12.7) linearly scans the sample surface using a very fine electron beam (approx.  $0.01\ \mu\text{m}$  in diameter). When the primary electrons of the electron beam impinge on the surface of the testpiece, secondary electrons are released from the sample. These are then picked up by the electron detector. After amplification of the signal, the local distribution of secondary electrons is shown on the screen.*





Abb./Fig. 12.7: Rasterelektronenmikroskop (REM)  
*Scanning electron microscope (SEM)*

Da aus herausragenden Oberflächenteilen in Abhängigkeit von der Beschleunigungsspannung der Primärelektronen viele Sekundärelektronen herausgelöst werden, erscheinen diese Bereiche hell, während tieferliegende Zonen dunkler bleiben. Verbunden mit einer Schattenbildung der aus der Probe emittierten Elektronen entsteht so ein plastisches Bild der Oberfläche, das sich durch große Schärfentiefe und hohe Auflösung auszeichnet.

Des Weiteren werden Rückstreuелеktronen des primären Elektronenstrahls detektiert. Je höher das Atomgewicht, desto mehr Elektronen werden rückgestreut. Das Rückstreuелеktronenbild lässt also Rückschlüsse über die chemische Elementverteilung zu.

*As many secondary electrons are released from protruding surface regions, depending on the acceleration voltage of the primary electrons these areas appear light, whereas deeper lying zones remain dark. Combined with shadow formation caused by the inclination of the electron beam, a plastic image of the surface is generated that is characterized by great depth of field and high resolution.*

*Furthermore, backscattered electrons of the primary electron beam are detected. The higher the atom weight, the more electrons are backscattered. The backscattered electron image therefore allows conclusions to be drawn about the chemical composition.*

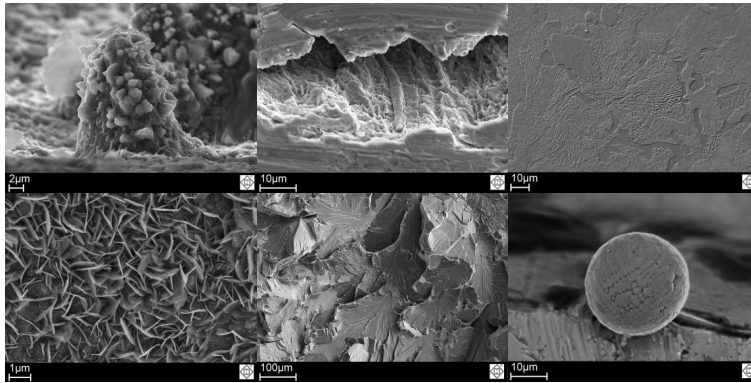


Abb./Fig. 12.8: REM-Aufnahmen  
SEM images

Das Auflösungsvermögen des REM beträgt üblicherweise bis  $0,01\ \mu\text{m}$ , die Schärfentiefe bei 1.000-facher Vergrößerung etwa  $35\ \mu\text{m}$ . Die maximal sinnvolle Vergrößerung kann mit steigender Beschleunigungsspannung der Primärelektronen bis zu 100.000-fach betragen.

Die große Schärfentiefe macht das Rasterelektronenmikroskop besonders geeignet für die Untersuchungen von Bruchflächen (Mikrofraktografie) und sonstigen Schäden. Das REM wird deshalb auch in starkem Maß für Schadensuntersuchungen eingesetzt. Die Deutung der Bilder erfordert allerdings entsprechende Erfahrung.

Neben den oben beschriebenen Probensignalen aus Sekundär- und Rückstreuelektronen entsteht durch die Wechselwirkung des Primärelektronenstrahls mit dem Probenwerkstoff im REM eine schwache Röntgenstrahlung.

*The resolution of the SEM is usually up to  $0.01\ \mu\text{m}$ ; the depth of field lies at around  $35\ \mu\text{m}$  at a magnification of 1,000 times. The maximum useful magnification may be up to 100,000 times with increasing acceleration voltage of the primary electrons.*

*The great depth of field makes the scanning electron microscope particularly suitable for analyzing fractured surfaces (microfractography) and other faults. The SEM is thus used to a large degree in damage analyses. Interpreting the images requires a high level of experience, however.*

*Besides the testpiece signals from secondary and backscattered electrons, a weak x-ray is generated in the SEM through the interaction of the primary electron beam and the testpiece material.*

Die Auswertung dieses Röntgenspektrums ermöglicht eine relativ präzise Analyse der in der Probe befindlichen chemischen Elemente (EDX Analyse).

*The assessment of this x-ray spectrum enables a relatively precise analysis of the chemical elements found in the testpiece (EDX analysis).*

Die Auswertung der Wechselwirkungssignale der Rückstreuielektronen miteinander führt bei kristallinen Proben zu einer weiteren Analysemöglichkeit. Ist der in der Probe befindliche Kristalltyp bekannt, so lässt sich damit eine Aussage über dessen Orientierung in der Probe treffen. Damit lassen sich bei geeigneten Proben beispielsweise Texturen oder Verzerrungen erkennen (EBSD-Analyse).

*The evaluation of the interaction signals of the backscattered electrons leads to an additional analysis possibility in the case of crystalline testpieces. If the type of crystal in the testpiece is known, a statement may be made regarding its orientation. In suitable testpieces, textures or distortions may be discerned, for example (EBSD analysis).*

Zusammen mit den konventionellen labortechnischen Untersuchungen können mit dem REM mit EDX- und EBSD-Einrichtung tiefgehende werkstofftechnische Fragestellungen gelöst werden. Wenn ein REM in-house verfügbar ist, reduziert dies natürlich Antwortzeiten drastisch und die Anwendungskompetenz steigt kontinuierlich.

*Together with conventional laboratory analyses, the SEM with EDX and EBSD capability helps in solving intricate material science problems. If an SEM is available in-house, development times can be drastically reduced and application competence continually increases.*

# 13 Schlussfolgerungen und Ausblick

## *Conclusions and Outlook*

In dem vorliegenden Buch wurden die Technologien zur Herstellung von massivumgeformten Komponenten durch verschiedenste Beispiele erläutert. Zusammenfassend lässt sich für die Verfahren der Massivumformung Folgendes feststellen:

*This book has outlined technologies for producing forged components using a wide range of examples. In summary, the following can be said of forging operations:*

Die Massivumformung bietet für ein breites Spektrum an Bauteilen sowie für alle Stückzahlen und Stückgewichte ein passendes Einzelverfahren an.

*Forging offers suitable processes for a broad spectrum of components, as well as for almost any number of pieces and weights.*

Massivumgeformte Werkstücke sind den durch konkurrierende Verfahren hergestellten Werkstücken bezüglich ihrer mechanischen Eigenschaften eindeutig überlegen, und es können beinahe alle Werkstoffe, insbesondere nahezu alle Stahlwerkstoffe, verarbeitet werden.

*Forged parts display properties which make them considerably superior to parts produced by competing processes. Furthermore, almost all metals, in particular all steels, can be processed by means of forging.*

Durch gut entwickelte stabile Prozesse lässt sich auch bei Massenfertigung ein konstant hohes Qualitätsniveau halten.

*By establishing well-developed, stable processes, a consistently high level of quality can be maintained, even during mass production.*

Durch Mechanisierung und Automatisierung lassen sich kostengünstig Bauteile herstellen.

*Mechanization and automation enable components to be produced in a cost-efficient way.*

Bei Großserien lassen sich durch entsprechende Sondermaßnahmen hochpräzise Bauteile umformen, die nur noch minimal spanend nachbearbeitet werden müssen.

*By taking appropriate measures, it is possible to forge high-precision components during large production runs that only require very little subsequent machining.*

Zukünftige Entwicklungen der Massivumformung werden sich insbesondere in folgenden Fachgebieten ergeben:

*Future developments in forging will occur in the following specialist areas in particular:*

Die Simulationsverfahren zur Auslegung der Bauteilgestalt und der Fertigungsprozesse werden weiterentwickelt. Ebenso wird die Tribologie weiter untersucht werden, da profunde Kenntnisse der Vorgänge in der Fuge zwischen Werkstück und Werkzeug dazu beitragen, den Werkzeugverschleiß zu vermindern. Hier liegen noch Qualitäts- und Kostenpotenziale.

In der Umformtechnik werden insbesondere die Verfahren weiterentwickelt werden, mit denen sich einbaufertige Funktionsflächen herstellen lassen (Net-Shape-Forging oder Präzisionsumformung). In diesem Zusammenhang werden auch intelligente Werkzeugsysteme mit Mehrfachbewegungen zum Einsatz kommen. Derartige Verfahren werden aber grundsätzlich immer produktspezifisch zu sehen sein.

Neben diesen grundsätzlichen technisch-wissenschaftlichen Trends werden aber auch betriebs- und volkswirtschaftliche Weiterentwicklungen zu beachten sein. Hier sind vor allem zu erwähnen:

Aufgrund abnehmender Fertigungstiefe bei den Hauptkunden muss der Massivumformer in Zukunft auch die Weiterverarbeitung seiner Teile bis hin zu vormontierten Baugruppen oder zur Systemherstellung anbieten.

Die Globalisierung der Abnehmer zwingt die Massivumformindustrie, ebenfalls global zu denken. Dies kann durch Allianzen mit Partnerfirmen erfolgen, die sich von losen Kooperationen bis hin zu finanziellen Beteiligungen erstrecken können. Bei genügender Finanzierungsbasis ist auch eine globale Aufstellung ohne externe Partner möglich.

*Simulation processes for designing components and production processes will see further development. Research will continue into tribology, as a better understanding of the processes which take place in the contact area between workpiece and tool assists in minimizing tool wear. This holds potential with respect to quality and costs.*

*In metal forging technology, it will be those processes with which ready-for-assembly functional surfaces can be produced (net-shape forging or precision forging) that will receive particular attention in the future. Within the framework of this, intelligent tool systems with multiple movements will be employed. Such processes will, however, always be specific to a particular product.*

*Aside from the aforementioned engineering/scientific trends, certain operational and economic trends will also be of importance. In this context, the following are worthy of particular note:*

*Due to decreasing vertical integration on the part of major customers, metal forging companies must be in a position to offer further processing of their parts right through to pre-mounted assemblies or system production.*

*Globalization among customers is compelling the forging industry to likewise think globally. This can be achieved by creating alliances with partner companies. These alliances can range from informal co-operations right up to financial shareholding. With a sufficient financial basis a global set-up is even possible without external partners.*

Die Massivumformer werden noch konsequenter die Forderungen des Simultaneous Engineering umsetzen und dem Kunden über die reine Verfahrensentwicklung hinaus zunehmend Entwicklungsleistungen für seine Bauteile anbieten.

*Forging companies will employ Simultaneous Engineering even more consistently and offer their customers not only pure process development, but also, increasingly, development services for their components.*

Die Umformunternehmen, die sich diesen Trends aktiv stellen und die technisch-wissenschaftlichen Entwicklungen entsprechend mitgestalten, werden auch in Zukunft erfolgreich am Markt teilnehmen.

*Those metal forging companies who actively set such trends and contribute to engineering/scientific developments will be the ones who will continue to participate successfully on the market in future.*

# 14 Weiterführende Literatur

## *Further Reading*

### **Umformtechnik** *Metal Forging*

- Altan, T., Oh, S.-I., Gegel, H. L.: Metal Forming Fundamentals and Applications, American Society for Metals, 1983
- Dieter, G. E.: Mechanical Metallurgy, SI Metric Edition, McGraw-Hill, 1988
- Lange, K.: Umformtechnik - Handbuch für Industrie und Wissenschaft. Band 1 - 4. Springer, 1988
- Schuler (Hrsg.): Handbuch der Umformtechnik, Springer, 1996  
(in German and English)

### **Plastomechanik und Finite Elemente** *Plasto Mechanics and Finite Elements*

- Kobayashi, S., Oh, S.-I., Altan, T.: Metal Forming and the Finite-Element Method, Oxford University Press, 1989

### **Fertigungstechnik** *Manufacturing Technology*

- Klocke, F., König, W.: Fertigungsverfahren - Band 1 - 4, Springer, div. Erscheinungsjahre *diverse years of publication*

### **Allgemeiner Maschinenbau** *General Mechanical Engineering*

- Beitz, W., Grote, K.-H.: Taschenbuch für den Maschinenbau - Dubbel, Springer, 2001

### **Tribologie** *Tribology*

- Stachowiak, G., Batchelor, A. W.: Engineering Tribology, Butterworth Heinemann, 2005

### **Werkstoffe und Faserverlauf in Stahl** *Materials and Fibre Flow in Steel*

- Dahl, W., Kopp, R., Pawelski, O.: Umformtechnik Plastomechanik und Werkstoffkunde, Verlage Stahleisen Düsseldorf, 1993
- Raedt, H.-W., Speckenheuer, U., Vollrath, K.: Neue massivumgeformte Stähle - Energieeffiziente Lösungen für leistungsfähigere Bauteile, ATZ 03/2012 *also available in English: New Forged Steels - Energy-efficient Solutions for Stronger Parts*
- Gottstein, G.: Physikalische Grundlagen der Materialkunde, Springer, 2007
- Schuster, A.: Charakterisierung des Faserverlaufs in umgeformten Stählen und dessen Auswirkungen auf mechanische Eigenschaften, Dissertation TU Dortmund, 2012

# Hirschvogel Automotive Group

Hirschvogel Holding GmbH  
Dr.-Manfred-Hirschvogel-Straße 6  
86920 Denklingen, Deutschland/Germany

Telefon/Phone: +49 8243 291-0  
hhg@hirschvogel.com

## **Haftung** ***Liability***

Die Informationen, die die Hirschvogel Holding GmbH Ihnen in diesem Buch zur Verfügung stellt, wurden mit größtmöglicher Sorgfalt zusammengestellt. Trotz sorgfältigster Kontrolle kann die Fehlerfreiheit nicht garantiert werden. Die Hirschvogel Holding GmbH schließt daher jede Haftung oder Garantie hinsichtlich der Genauigkeit, Vollständigkeit und Aktualität in diesem Buch aus.

*The information which Hirschvogel Holding GmbH makes available in this book was compiled with the greatest of care. In spite of the utmost care that has been taken, it cannot be guaranteed that the contents are error-free. Hirschvogel Holding GmbH therefore excludes any liability or guarantee with respect to the precision, completeness and up-to-dateness of the information in this book.*

## **Urheberrechte** ***Copyrights***

Copyright Hirschvogel Holding GmbH. Alle Rechte vorbehalten. Der Inhalt einschließlich Bilder und die Gestaltung dieses Buchs unterliegen dem Schutz des Urheberrechts und anderer Gesetze zum Schutz geistigen Eigentums. Die Veränderung des Inhalts dieses Buchs ist nicht gestattet. Darüber hinaus darf dieser Inhalt nicht zu kommerziellen Zwecken kopiert, verbreitet, verändert oder Dritten zugänglich gemacht werden.

*Copyright Hirschvogel Holding GmbH. All rights reserved. The contents, including images and the design of this book, are subject to copyright protection and other laws for the protection of intellectual property. The alteration of the contents of this book is not permitted. Furthermore, this content may not be copied, distributed, altered or made accessible to third parties for commercial purposes.*



# Index (Deutsch)

- Abwälzfräsen, 91
- Aluminium, 52
- Aluminiumlegierungen, 123
- Armierungen, 72
- Austenit, 8
  
- Bohren, 85
  
- Datenaustausch, 130
- Dauerwechselfestigkeit, 2
- DIN 10243, 45
- DIN 10254, 45
- DIN 5480, 106
- Drehen, 85
  
- EBS, 138
- ECM, 94
- EDX, 138
- Einsatzhärten, 120
- Eisen-Kohlenstoff-Diagramm, 14
- Elektrochemisches Abtragen, 94
  
- Faserverlauf, 1
- FEM-Berechnung (Bauteil), 135
- FEM-Systeme, 132
- Ferrit, 8
- Festigkeitsstrahlen, 122
- Finishen, 88
- Finite-Element-Methode, 132
- Fließbedingung, 19
- Fließpressverfahren, 28
- Fließspannung, 59
- FMEA, 127
- FP-Glühen, 114
- Fräsen, 83
  
- Freiformschmieden, 24
  
- Gesenkschmieden, 27
- Gestaltoptimierung, 134
- Glühen auf kugeligen Zementit, 118
- Gratlosschmieden, 31
- Grenzumformgrad, 59
  
- Halbwarmumformung, 58
- Hexagonale Kristallstruktur, 8
- Hohlteile, 78
  
- Induktivhärten, 119, 121
- Isothermglühen, 114
  
- Kaltprägen, 33
- Kaltstauchen, 26
- Kaltumformung, 67
- Kaltwalzen, 90
- Karbidbildung, 16
- Kombinationsverfahren, 34
- Kontrollierte Abkühlung, 117
- Korngrenzen, 9
- Kristallstrukturen, 6
- Kubisch flächenzentriertes Kristallgitter, 6
  
- Maschinen für Kaltumformung, 71
- Maschinenarten (Warmumformung), 41
- Matrizenverband, 72
- Montage, 96
  
- Near-Net-Shape, 63
- Net-Shape, 63
- Nichteisenmetalle, 111
- Nitrieren, 121
- Normalglühen, 113

Oberflächenbehandlung, 121

P-Behandlung, 117

Planschleifen, 87

Plasmanitrieren, 122

Prüfen, 96

Prozesssimulation, 136

Qualitätsmanagement, 125

Qualitätsprüfung, 96

Querkeilwalzen, 32

Räumen, 89

Rapid Prototyping, 137

Rasterelektronenmikroskop, 138

Reckwalzen, 33

Reibschweißen, 93

Rekristallisation, 12

Rekristallisationsglühen, 118

REM, 138

Rundkneten, 25

Rundschleifen, 88

Schleifen, 86

Schmiedegüte, 46

Schraubenversetzung, 9

Schubfließgrenze, 19

Schubspannungshypothese, 19

Simultaneous Engineering, 129

Spannungs-Dehnungs-Diagramm, 18

SPC, 127

Stahlwerkstoffe, 109

Stauchern, 26

Streckgrenze, 18

Stufenversetzung, 9

Tieflochbohren, 86

Titan, 52, 113

Topologieoptimierung, 133

Umformverhalten (Werkstoffe), 109

Verfahrenskombinationen, 34

Vergüten, 116, 117

Versetzungen, 9

Verzahnungen, 80, 89

Verzahnungen (Fließpressen), 77, 80, 92

Verzahnungsfräsen, 91

Wärmebehandlung (Aluminium), 123

Wärmebehandlungsverfahren, 114, 115

Warmstauchen, 26

Warmumformung, 37

Weichglühen, 118

Zunderbildung, 59

## ***Index (English)***

- Aluminum Alloys*, 123
- Aluminum*, 52
- Assembly*, 96
- Austenite*, 8
  
- Broaching*, 89
  
- Carbide Formation*, 16
- Case Hardening*, 120
- Closed-Die Forging*, 27
- Cold Coining*, 33
- Cold Forging Machines*, 71
- Cold Forging*, 67
- Cold Rolling*, 90
- Cold Upsetting*, 26
- Combined Processes*, 34
- Controlled Cooling*, 117
- Cross Wedge Rolling*, 32
- Crystal Structures*, 6
- Cylindrical Grinding*, 88
  
- DIN 10243*, 45
- DIN 10254*, 45
- DIN 5480*, 106
- Data Exchange*, 130
- Deep-Hole Drilling*, 86
- Die Assembly*, 72
- Dislocations*, 9
- Drilling*, 85
  
- ECM*, 94
- Edge Dislocation*, 9
- Electrochemical Machining*, 94
- Extrusion Processes*, 28
  
- FEM Analysis (Component)*, 135
- FEM Systems*, 132
- FMEA*, 127
- Face-Centered Cubic Lattice*, 6
- Fatigue Strength*, 2
- Ferrite*, 8
- Fiber Flow*, 1
- Finishing*, 88
- Finite Element Method*, 132
- Flashless Hot Forging*, 31
- Flow Stress*, 59
- Forging Behavior (Materials)*, 109
- Forging Grade*, 46
- Friction Welding*, 93
  
- Gear Milling*, 91
- Gears (Cold Forging)*, 77, 80, 92
- Gears and Splines*, 80, 89
- Grain Boundaries*, 9
- Grinding*, 86
  
- Heat Treatment (Aluminum)*, 123
- Heat Treatment Processes*, 114, 115
- Hexagonal Crystal Structure*, 8
- Hollow Parts*, 78
- Hot Forging*, 37
- Hot Upsetting*, 26
  
- Induction Hardening*, 119
- Iron-Carbon Diagram*, 14
- Isothermal Annealing*, 114
  
- Machine Types (Hot Forging)*, 41
- Maximum Shear Stress Criterion*, 19
- Milling*, 83
  
- Near-Net-Shape*, 63

*Net-Shape*, 63  
*Non-Ferrous Metals*, 111  
*Normalizing*, 113

*Open-Die Forging*, 24  
*Oxide Formation*, 59

*P-Treatment*, 117  
*Permissible Plastic Strain*, 59  
*Plasma Nitriding*, 122  
*Process Combinations*, 34  
*Process Simulation*, 136

*Quality Management*, 125  
*Quality Testing*, 96  
*Quenching and Tempering*, 116, 117

*Rapid Prototyping*, 137  
*Recrystallization Annealing*, 118  
*Recrystallization*, 12  
*Reducer Rolling*, 33

*SEM*, 138  
*SPC*, 127  
*Scanning Electron Microscope*, 138  
*Screw Dislocation*, 9  
*Shape Optimization*, 134  
*Shear Yield Point*, 19  
*Shot Peening*, 122  
*Shrinkage Rings*, 72  
*Simultaneous Engineering*, 129  
*Soft Annealing*, 118  
*Spheroidizing*, 118  
*Steel Materials*, 109  
*Stress-Strain Curve*, 18  
*Surface Grinding*, 87  
*Surface Treatment*, 121  
*Swaging*, 25


*Testing*, 96  
*Titanium*, 52, 113  
*Topology Optimization*, 133  
*Turning*, 85

*Upsetting*, 26

*Warm Forging*, 58

*Yield Condition*, 19  
*Yield Point*, 18





Massivumgeformte Komponenten sind in vielen Anwendungsbereichen Schlüsselbauteile für die Übertragung von Kräften und Momenten. Aufgrund ihrer herausragenden Werkstoffeigenschaften erlauben sie es, höchste Leistungsdichten zu erreichen.

In diesem Buch werden die Prozesse zum Herstellen massivumgeformter Komponenten dargestellt. Die Eigenschaften der verwendeten Werkstoffe und die Entwicklungs- und QM-Methoden runden die Darstellung ab. An geeigneter Stelle illustrieren zahlreiche Beispiele die Potenziale massivumgeformter Komponenten.

*Forged parts are key components for transmitting forces and torques in many application areas. Due to their outstanding material properties they can achieve the highest possible power densities, enabling the design of truly lightweight solutions.*

*This book will present the processes for producing forged components. Subsequently, the properties of the materials used and development and QM methods are outlined. Several examples will serve to demonstrate the potential that forged components hold.*