

Eckart Doege[†] · Bernd-Arno Behrens
Handbuch Umformtechnik

Eckart Doege[†] · Bernd-Arno Behrens

Handbuch Umformtechnik

Grundlagen, Technologien, Maschinen

Mit 756 Abbildungen und 55 Tabellen

 Springer

Prof. Dr.-Ing. Eckart Doege[†]
Prof. Dr.-Ing. Bernd-Arno Behrens
Leibniz Universität Hannover
Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen
An der Universität 2
30823 Garbsen
behrens@ifum.uni-hannover.de

Bibliografische Information der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

ISBN-10 3-540-23441-1 Springer Berlin Heidelberg New York
ISBN-13 978-3-540-23441-8 Springer Berlin Heidelberg New York

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

Springer ist ein Unternehmen von Springer Science+Business Media

springer.de

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2007

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften. Text und Abbildungen wurden mit größter Sorgfalt erarbeitet. Verlag und Autor können jedoch für eventuell verbliebene fehlerhafte Angaben und deren Folgen weder eine juristische Verantwortung noch irgendeine Haftung übernehmen.

Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z. B. DIN, VDI, VDE) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden sein, so kann der Verlag keine Gewähr für die Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuziehen.

Satz: Reproduktionsfähige Vorlage der Autoren
Herstellung: LE-TeX Jelonek, Schmidt & Vöckler GbR, Leipzig
Einbandgestaltung: Struve & Partner, Heidelberg

Gedruckt auf säurefreiem Papier SPIN 10941157 7/3100/YL – 5 4 3 2 1 0

Vorwort

Das vorliegende „Handbuch Umformtechnik“ versucht, eine inhaltliche Verbindung zwischen den theoretischen Grundlagen und dem praktischen Einsatz der Umformtechnik herzustellen. Es wurde von meinem Vorgänger als Leiter des Instituts für Umformtechnik und Umformmaschinen der Universität Hannover, Prof. Dr.-Ing. Eckart Doege†, konzipiert, der im April 2004 verstarb.

Das Buch soll für Studierende ein Hilfsmittel sein, das in den Vorlesungen vermittelte Wissen zu vertiefen und zu festigen. Darüber hinaus kann es Ingenieuren und Technikern im praktischen Alltag als übersichtliches Nachschlagewerk dienen. Ziel war es, die komplexen Vorgänge und Prozesse der Umformtechnik möglichst anschaulich und nachvollziehbar darzustellen.

Nach einer ausführlichen Darstellung der theoretischen Grundlagen widmen sich drei eigenständige Kapitel der Blechumformung, der Massivumformung sowie den Maschinen der Umformtechnik. Der inhaltliche Schwerpunkt liegt dabei in Themen, die in den letzten Jahrzehnten am Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen in Hannover bearbeitet wurden.

Ein großer Dank gilt all denjenigen Mitarbeitern meines Instituts, die einen erheblichen Teil ihrer Zeit geopfert haben, um dieses Buch zusammenzustellen. Darüber hinaus bedanke ich mich bei meinen Kollegen aus der Arbeitsgemeinschaft Umformtechnik (AGU) sowie den Vertretern zahlreicher Firmen, die durch ihre gewissenhafte Durchsicht und ihre wertvollen Anregungen einen wichtigen Beitrag zum Gelingen geleistet haben.

Leider war es Prof. Doege† nicht mehr vergönnt, die Fertigstellung des Buches zu erleben. Sämtliche Beteiligten haben dennoch versucht, das „Handbuch Umformtechnik“ in seinem Sinne zu vollenden.

Hannover, Sommer 2006

Bernd-Arno Behrens

Mitarbeiter

An der Entstehung des „Handbuchs Umformtechnik“ waren die nachfolgenden aktuellen und ehemaligen Mitarbeiter des Instituts für Umformtechnik und Umformmaschinen beteiligt:

Kapitel Grundlagen der Umformtechnik:

Madjid Alasti, Dr. Jens Baumgarten, Anas Bouguecha, Helge Dähndel, Dr. Björn Haller, Dr. Kamel Hanini, André Hundertmark, Matthias Kammler, Dr. Frank Meiners, Jens Poelmeyer, Olaf Pösse, Stefan Röhr, Amer Sabitovic, Bernd Sann, Falko Schäfer, Dr. Bianca Springub, Christina Sunderkötter

Kapitel Blechumformung:

Dr. Günter Deiler, Dr. Michael Gulde, Dr. Sven Hübner, Marcus Kamp, Dr. Steffen Kulp, Dr. Gerrit Kurz, Martin Milch, Stefan Mütze, Bernd Sann, Cord Schäffner, Thorsten Suhrkamp, Christina Sunderkötter, Dr. Oliver Vogt, Dr. Jae-Woong Yun

Kapitel Massivumformung:

Dr. Lutz Barnert, Helge Dähndel, Dirk Fischer, Edin Gastan, Dr. Michael Gulde, Dr. Björn Haller, Manfred Hoffmann, Dr. Aziz Huskić, Dr. Günter Klawitter, Dr. Frank Meiners, Andreas Puchert, Bernd Sann, Insa Schmidt, Dr. Tobias Wesnigk

Kapitel Umformmaschinen:

Michael Ahrens, Jörg Brandt, Marc-Jean Derenthal, Mohsen Javadi, Marcus Kamp, Dr. Richard Krimm, Olaf Marthiens, Edzard Schaeper, Dr. Markus Schaprian, Michael Werbs

Inhalt

1 Einleitung	1
1.1 Entwicklung und wirtschaftliche Bedeutung der Umformtechnik	1
1.1.1 Historische Entwicklung (der Umformtechnik).....	1
1.1.2 Gründung umformtechnischer Institute in Deutschland	3
1.1.3 Wirtschaftliche Bedeutung der Umformtechnik	5
1.1.4 Definitionen der Umformtechnik.....	6
1.2 Einteilung der Umformverfahren	8
1.2.1 Einteilung der Fertigungsverfahren nach DIN	8
1.2.2 Einteilung der Umformverfahren nach DIN	10
Literatur zu Kapitel 1	12
2 Grundlagen der Umformtechnik	13
2.1 Werkstoffverhalten.....	13
2.1.1 Werkstoffkundliche Aspekte	13
2.1.2 Metallkundliche Grundlagen	35
2.2 Bezogene und logarithmische Formänderung	55
2.3 Umformgeschwindigkeit.....	63
2.4 Fließkurven und Aufnahmeverfahren	64
2.4.1 Klassischer Zugversuch	68
2.4.2 Zugversuch nach Siebel	70
2.4.3 Auswertung der Breiteneinschnürung bei einer Flachzugprobe ...	71
2.4.4 Zugversuch nach Reihle.....	77
2.4.5 Zugversuch an vorgewalzten Blechproben	83
2.4.6 Hydraulische Tiefung	84
2.4.7 Zylinderstauchversuch	88
2.4.8 Kegelstauchversuch	89
2.4.9 Einfluss von Temperatur und Umformgeschwindigkeit auf die Fließspannung.....	90
2.5 Einführung in die Berechnung umformtechnischer Prozesse.....	95
2.5.1 Gemeinsame Grundlagen der Elastizitäts- und Plastizitätsrechnung	96
2.5.2 Elastizitätsrechnung	125
2.5.3 Plastizitätsrechnung	146
2.5.4 Umformkraft und Umformarbeit	173
2.5.5 Berechnungsverfahren der Plastizitätsrechnung	185
2.6 Einfluss der Reibung auf den Umformprozess.....	221
2.6.1 Reibungszustände	223

2.6.2	Oberflächenkenngrößen für Werkzeuge	226
2.6.3	Mathematische Beschreibung der Reibung.....	232
2.6.4	Experimentelle Ermittlung des Reibwerts	240
	Literatur zu Kapitel 2.....	252
3	Blechumformung.....	257
3.1	Verfahren der Blechumformung	257
3.2	Tiefziehen im Anschlag	260
3.2.1	Spannungen beim Tiefziehen.....	263
3.2.2	Formänderungen im Flanschbereich.....	265
3.2.3	Kräfte beim Tiefziehen	268
3.2.4	Krafteinleitung beim Tiefziehen	278
3.2.5	Verlauf der örtlichen Formänderungen.....	285
3.2.6	Berücksichtigung des Anstiegs der Kaltverfestigung im Ziehteilflansch	286
3.2.7	Einfluss Fließkurvenlage auf das Grenzziehverhältnis	288
3.2.8	Versagensarten.....	290
3.2.9	Einflussgrößen auf das Tiefziehergebnis	290
3.2.10	Ermittlung des Arbeitsbereichs (Gutteilfenster)	291
3.3	Tiefziehen im Weiterschlag	294
3.4	Blechprüfverfahren	294
3.4.1	Näpfchenprüfung nach Swift.....	295
3.4.2	Ermittlung des Grenzziehverhältnisses nach Schmidt	296
3.4.3	Ziehverhältnis nach Dutschke für nichtrotatorische Geometrien	297
3.4.4	Ericksen-Prüfung nach ISO20482	297
3.4.5	Engelhardt-Test.....	298
3.4.6	Zugversuch nach EN10002 und EN10130.....	300
3.4.7	Kreuzzugversuch	306
3.4.8	Ermittlung von Grenzformänderungskurven	309
3.5	Ermittlung von lokalen Formänderungen	314
3.6	Werkzeugtechnik für das Tiefziehen.....	320
3.6.1	Aufbau von Tiefziehwerkzeugen.....	320
3.6.2	Betätigungsarten des Niederhalters.....	330
3.6.3	Niederhaltersysteme.....	339
3.7	Wirkmedienbasierte Umformung.....	347
3.7.1	Hydromechanisches Tiefziehen	348
3.7.2	Beheiztes hydromechanisches Tiefziehen	352
3.7.3	Hochdruckblechumformung (HBU)	354
3.7.4	Fluidzell-Umformung	355
3.7.5	Innenhochdruck-Umformung (IHU).....	356
3.8	Warmumformung.....	359
3.8.1	Beheiztes Tiefziehen.....	359
3.8.2	Presshärten	364
3.9	Sonderverfahren der Blechumformung	366
3.10	Scherschneiden	368
3.11	Biegen	376

3.11.1 Biegeverfahren.....	376
3.11.2 Richten durch Biegen.....	382
3.12 Fügen	384
3.12.1 Bördeln	384
3.12.2 Falzen.....	393
3.12.3 Clinchen.....	400
3.12.4 Stanznieten.....	408
3.13 Werkzeugverschleiß beim Umformen	411
3.13.1 Verschleißmechanismen	411
3.13.2 Maßnahmen zur Verschleißreduktion.....	417
3.13.3 Weitere Maßnahmen zur Verschleißreduktion	429
3.14 Blechwerkstoffe	438
3.14.1 Stähle	438
3.14.2 Aluminiumlegierungen	444
3.14.3 Magnesiumlegierungen.....	447
3.14.4 Reintitanwerkstoffe.....	450
3.14.5 Beschichtete Bleche.....	453
Literatur zu Kapitel 3	456
4 Massivumformung	471
4.1 Einteilung der Verfahren.....	471
4.2 Stauchen.....	474
4.2.1 Kenngrößen beim Stauchen	474
4.2.2 Spannungsverhältnisse beim Stauchen	476
4.2.3 Umformarbeit	486
4.2.4 Verfahrensgrenzen beim Stauchen	489
4.2.5 Reibungseinfluss beim Stauchversuch.....	492
4.3 Freiformschmieden	494
4.3.1 Sattelformen.....	496
4.3.2 Bauteilformen	496
4.3.3 Vor- und Nachteile des Freiformschmiedens.....	497
4.4 Gesenkschmieden.....	499
4.4.1 Grundlagen des Gesenkschmiedens.....	500
4.4.2 Verfahrensablauf.....	529
4.4.3 Werkzeugtechnik	570
4.4.4 Verschleiß von Schmiedegesenken.....	580
4.4.5 Warmarbeitsstähle für den Gesenkbau	615
4.4.6 Schmiedestähle	623
4.4.7 Einfluss der Umformmaschine auf den Schmiedeprozess	623
4.4.8 Vor- und Nachteile des Gesenkschmiedens.....	624
4.5 Fließpressen	627
4.5.1 Verfahren mit Beispielbauteilen	627
4.5.2 Voll-Vorwärts-Fließpressen.....	630
4.5.3 Hohl-Vorwärts-Fließpressen.....	644
4.5.4 Napf-Rückwärts-Fließpressen.....	649
4.5.5 Verfahrensablauf beim Fließpressen.....	653

4.5.6	Verfahrenstypische Eigenschaften des Kaltfließpressens	662
4.6	Strangpressen	663
4.6.1	Strangpressprofile – Auswahl herstellbarer Formen	664
4.7	Massivumformung von Leichtmetallen	666
4.7.1	Schmieden von Aluminiumlegierungen.....	666
4.7.2	Schmieden von Magnesiumlegierungen	678
4.8	Thixoschmieden als Sonderverfahren der Massivumformung	683
4.8.1	Definition Thixotropie (rheologische Grundlagen)	685
4.8.2	Besondere Anforderungen an den Werkstoff.....	685
4.8.3	Verfahrensanforderungen	687
4.8.4	Vorteile des Thixoschmiedens	693
4.9	Pulverschmieden	694
4.9.1	Verfahrensablauf bei der Herstellung von Sinterteilen	695
4.9.2	Technologie des Pulverschmiedens	697
	Literatur zu Kapitel 4	701
5	Umformmaschinen.....	711
5.1	Einteilung der Umformmaschinen	711
5.2	Arbeitsgebundene Umformmaschinen	717
5.2.1	Schmiedehämmer	717
5.2.2	Spindelpressen	728
5.3	Weggebundene Umformmaschinen	743
5.3.1	Funktionsprinzip weggebundener Umformmaschinen	743
5.3.2	Bauarten weggebundener Umformmaschinen	743
5.3.3	Baugruppen von weggebundenen Pressen.....	754
5.3.4	Arbeitsvermögen der weggebundenen Umformmaschine	813
5.4	Kraftgebundene Umformmaschinen (Hydraulische Pressen)	823
5.4.1	Funktionsprinzip kraftgebundener Umformmaschinen	824
5.4.2	Baugruppen von kraftgebundenen Umformmaschinen.....	828
5.4.3	Bewertung von kraftgebundenen Pressen	836
5.5	Industrieller Einsatz von Umformmaschinen.....	838
5.5.1	Pressensysteme in der Karosseriefertigung.....	838
5.5.2	Schnellläuferpressen/Stanzautomaten.....	850
5.5.3	Weggebundene Schmiedepressen	861
5.5.4	Pressen für die Kaltumformung	864
5.5.5	Einarbeitungspressen	869
5.6	Genauigkeitskenngrößen von Umformmaschinen	873
5.6.1	Geometrische Genauigkeit der unbelasteten Maschine	873
5.6.2	Elastische Nachgiebigkeiten der belasteten Maschine	874
5.6.3	Messaufbau zur Bestimmung der Genauigkeit unter Last	885
5.6.4	Anteile der Baugruppen an der Maschinengenauigkeit	889
5.6.5	Auswirkung der Maschinen- und Werkzeugsteifigkeit.....	891
5.6.6	Verlagerungsverläufe (Beispiele)	895
	Literatur zu Kapitel 5	900
	Sachverzeichnis.....	903

1 Einleitung

1.1 Entwicklung und wirtschaftliche Bedeutung der Umformtechnik

1.1.1 Historische Entwicklung (der Umformtechnik)

5. bis 3. Jahrtausend v. Chr.

Die Anfänge der Umformtechnik liegen in prähistorischer Zeit. Bereits für den Übergang vom 5. zum 4. Jahrtausend v. Chr. konnte der Kupfererzabbau im Timna-Tal (Israel) nachgewiesen werden. Aus dieser Zeit sind aus Gold und hochangereicherten Kupfererzen durch Hämmern geformte Gegenstände bekannt.

Mit der Entdeckung des Erschmelzens von Kupfer Ende des 4./Anfang des 3. Jahrtausends v. Chr. verlor Stein als Werkzeugmaterial zunehmend an Bedeutung. Durch Zulegieren von Arsen konnte bereits eine Festigkeitssteigerung von Kupfer erzielt werden. Jedoch brachte erst die Entdeckung der Zinnbronze (Zinnanteil ca. 8 %) sowie die Erkenntnis, dass durch Kaltumformung eine weitere Festigkeitssteigerung erreicht werden kann, wirkungsvolle Werkzeuge hervor. Eine Einteilung der Bronzezeit zeigt Abb. 1.1 /Ane99, Joc94a, Joc94b, Joc94c, Joh53, Küh66, Müh00, Spu91, Wit43, Zip67/.

Für Norddeutschland gilt ebenso wie für den skandinavischen Raum eine andere Einteilung der Bronzezeit als für Mitteleuropa (Abb. 1.1). Während die Bronzezeit in Norddeutschland und Skandinavien nach Oscar Montelius (1843–1921) gegliedert wird, ist für den süddeutschen Raum die Einteilung nach Paul Reinecke (1872–1958) maßgeblich.

v. Chr.	Mitteleuropa	Norddeutschland
750	Ältere Eisenzeit	Späte Bronzezeit
1020	Jüngere Bronzezeit	Jüngere Bronzezeit
1300	Mittlere Bronzezeit	Ältere Bronzezeit
1500		
1950	Frühe Bronzezeit	Norddeutsches Spätneolithikum
2200	End-neolithikum	

Abb. 1.1 Einteilung der Bronzezeit (nach /Joc94a/)

Beide Einteilungen beruhen hauptsächlich auf Bestattungssitten und Grabformen. Die Frühbronzezeit ist z.B. durch das Flachhockergrab, die Mittelbronzezeit durch Hügelgräber mit Körperbestattungen und die Jungbronzezeit durch Feuerbestattungen gekennzeichnet /Joc94a/.

Entwicklung der Blechumformung

Etwa 4000 v. Chr.

Erste Ansätze der Blechumformung:

Herstellung handgetriebener Gefäße aus Kupfer und Gold in Ägypten und Mesopotamien (Zweistromland zwischen Euphrat und Tigris, heutiger Iran und Irak).

1400 v. Chr.

Weiterer Schritt in der Entwicklung der Blechumformung ist die Pressblechtechnik:

Mittels eines Presswerkstoffs (Leder, Holz) wird ein Blech über einen Formstempel bzw. in ein Gesenk gepresst und gegebenenfalls auch gehämmert. Beispiel: Formsteine von Mykene (Griechenland) und Knossos (Kreta), die aus dieser Zeit stammen.

1500 n. Chr.

Anwendung des Prinzips des Napfzugs bei der Herstellung von Fingerhüten.

Entwicklung des Schmiedens

Etwa 3000 v. Chr.

Entdeckung der Bronze (Kupfer + Zinn bis 8 %) im Nahen Osten (südliche Türkei).

Etwa 1100 v. Chr.

Verhüttung von Eisen, Verarbeitung des Roheisens durch Schmieden, Verwendung zunächst noch als Ziermetall (Schmuck).

900 bis 800 v. Chr.

Der wirkungsvolle Stielhammer aus Metall wird nachweislich im Mittelmeerraum zum Schmieden verwendet.

700 bis 500 v. Chr.

Eisen verdrängt Bronze bei der Herstellung von Waffen und Werkzeugen /Ane99, Ids03, Joc94b, Joc94c, Joh53, Küh66, Müh00, Spu91, Wed58, Wit43, Zip67/.

1.1.2 Gründung umformtechnischer Institute in Deutschland



Abb. 1.2 Standorte und Gründungsjahre umformtechnischer Institute in Deutschland

1.1.2.1 Erste Verarbeitungsstufe (Herstellung des Halbzeugs)

Zu Beginn der universitären Forschung wurde im Wesentlichen die Herstellung und Bereitstellung des Halbzeugs (z.B. Bleche, Rohre, Profile, Drähte) untersucht. Die zu diesem Zweck gegründeten umformtechnischen Institute sind in Tabelle 1.1 dargestellt (vgl. Abb. 1.2).

Besondere Bedeutung bei den Verfahren der ersten Verarbeitungsstufe haben das Walzen und das Freiformschmieden. Beim Übergang vom flüssigen in den festen Zustand entsteht bei Stahlwerkstoffen eine Schrumpfung von ca. 2 %. Die hierdurch im Gusswerkstoff zurückbleibenden Poren werden durch anschließendes Walzen oder Freiformschmieden geschlossen. So entsteht ein dichtes Gefüge, wie es für hochbeanspruchte „Leichtbauteile“ benötigt wird.

Tabelle 1.1 Gründungsjahre der sich mit der ersten Verarbeitungsstufe befassenden umformtechnischen Institute in Deutschland

Ort	Düsseldorf	Clausthal	Freiberg	Aachen	(Berlin)*
Gründungs- jahr	1917	1928	1928	1937	1940

*Lehrstuhl zurzeit nicht besetzt

1.1.2.2 Zweite Verarbeitungsstufe (Verarbeitung des Halbzeugs)

Nachdem die Erforschung der Herstellung von Halbzeugen bereits einen hohen wissenschaftlichen Stand erreicht hatte, gewann in den 50/60er Jahren des 20. Jh. die zweite Verarbeitungsstufe an Bedeutung.

Verfahren der zweiten Verarbeitungsstufe sind z.B.

- Blechumformung,
- Gesenkschmieden bzw. Warmumformung sowie
- Kaltumformung und Halbwarmumformung.

Um die einzelnen Verfahren bezüglich ihrer wirtschaftlichen Bedeutung gewichten zu können, zeigt Tabelle 1.2 eine grob geschätzte Übersicht. Im Zuge dieser Entwicklung wurden universitäre Institute gegründet, die sich mit der zweiten Verarbeitungsstufe befassen (Tabelle 1.3; vgl. Abb. 1.2, hell hinterlegt).

Tabelle 1.2 Verarbeitungstemperaturen und geschätztes Mengenverhältnis der Verfahren der zweiten Verarbeitungsstufe (nach /Ids03/; Bilder nach /Hir01/)

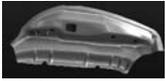
Verfahren	Blechumformung	Warmumformung	Kaltumformung	Halbwarmumformung
Verhältnis der verarbeiteten Mengen	100	10	1	0,2–0,3
Temperatur	kalt RT = 20 °C	warm 1000–1250 °C	kalt RT = 20 °C	warm 650–900 °C
Beispielbauteile	 Tiefgezogene Türverstärkung	 Geschmiedetes Schwenklager	 Getriebeteile m. einbaufertigen Verzahnungen	 Mittelnwelle

Tabelle 1.3 Gründungsjahre der sich mit der zweiten Verarbeitungsstufe befassenden umformtechnischen Institute in Deutschland

Ort	Aachen	Hannover	Magdeburg	Chemnitz	Stuttgart	Dresden	München	Dortmund	Darmstadt	Hamburg	Paderborn	Nürnberg-Erlangen	Kassel
Gründungsjahr	1937	1954	1954	1956 1992	1958	1968	1968	1971	1976	1978 1983	1979	1982	1993

1.1.3 Wirtschaftliche Bedeutung der Umformtechnik

In Zeiten der Energie- und Rohstoffverknappung zeigen die umformenden Fertigungsverfahren aufgrund einer im Vergleich zu spanenden Fertigungstechniken höheren Werkstoffausnutzung wesentliche Vorteile. Die in Abb. 1.3 aufgeführten Umformverfahren (Kalt-, Halbwarm- und Warmmassivumformung) erfordern zwar einen höheren spezifischen Energiebedarf bei der Werkstückherstellung, jedoch muss dieser stets in Relation zum Energiebedarf für die Rohteilherstellung gesehen werden /Her89/.

Aufgrund der hohen Materialausnutzung bei den umformtechnischen Fertigungsverfahren fallen bei einer Berechnung der Fertigteilkosten die Kosten für die Rohteilherstellung deutlich weniger ins Gewicht als bei den spanenden Verfahren. Daher ist der in Abb. 1.4 dargestellte relative Energiebedarf bezogen auf 1 kg Fertigteil für konventionelles Gesenkschmieden (Gesenkschmieden mit Grat) deutlich geringer als bei spanenden Verfahren.

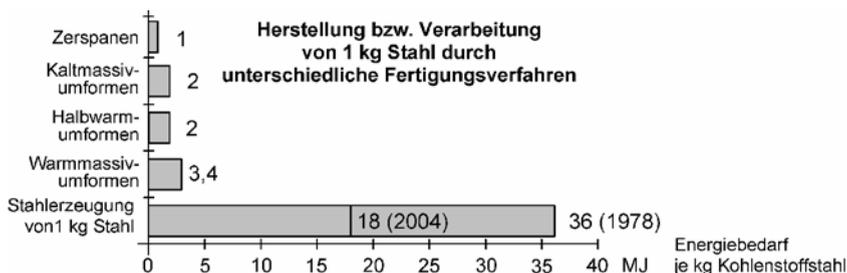


Abb. 1.3 Energiebedarf zur Werkstückherstellung durch verschiedene Fertigungsverfahren (nach /Lan78, Lün05/)

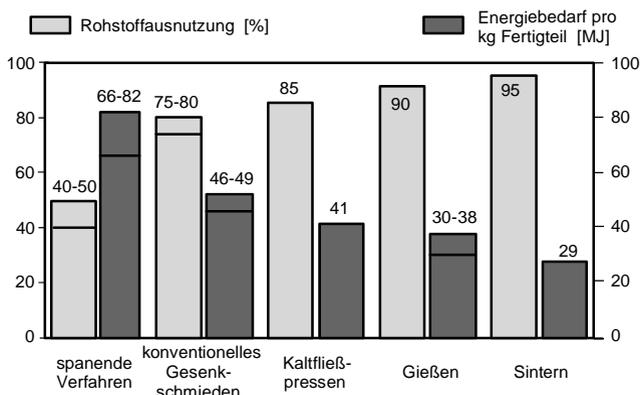


Abb. 1.4 Relativer Energiebedarf und Rohstoffausnutzung verschiedener Herstellungsverfahren einschließlich Aufwand für Stahlherstellung und Energiegehalt des Abfalls (nach /Her89/)

Das Kaltfließpressen erfordert einen noch geringeren relativen Energiebedarf als das Gesenkschmieden bei weiter gesteigerter Werkstoffausnutzung, jedoch ist bei diesem Verfahren das maximale Formänderungsvermögen des Werkstoffes begrenzt.

Das Gießen bietet eine hervorragende Werkstoffausnutzung und einen geringen Energiebedarf bei der Herstellung von Bauteilen, jedoch ist aufgrund von Poren, die infolge der Abkühlung durch Schrumpfung entstehen, die Festigkeit von Gussteilen gegenüber vergleichbaren Schmiedeteilen reduziert.

Bezüglich der Werkstoffausnutzung und des Energiebedarfs schneiden pulvermetallurgische Verfahren wie das Sintern sehr gut ab. Allerdings sind diese Verfahren mit einem vergleichbar großen Aufwand für Werkzeuge und Maschinen und dadurch mit hohen Prozesskosten verbunden. Aus diesem Grund werden pulvermetallurgische Verfahren nur bei sehr großen Stückzahlen eingesetzt oder wenn besondere Anforderungen an die Bauteile gestellt werden (z.B. große Wandstärkenänderungen) /Her89, Lan78/.

Insbesondere durch neue Entwicklungen im Bereich Schmieden, wie Präzisionsschmieden oder Thixoschmieden, kann die Werkstoffausnutzung schmiedetechnischer Verfahren nachhaltig verbessert und dem Trend zur endkonturnahen Fertigung entgegen gekommen werden (s. Kap. 4).

1.1.4 Definitionen der Umformtechnik

Nach DIN 8580 ist das Umformen definiert als Fertigen durch bildsames oder plastisches Ändern der Form eines festen Körpers. Dabei werden sowohl die Masse als auch der Stoffzusammenhalt beibehalten.

Abhängig von der Beherrschung der Geometrie wird unterschieden zwischen:

- *Umformen*: Ändern einer Form mit Beherrschung der Geometrie ("um" entspricht einer gewollten Veränderung wie Umbauen oder Umschmelzen), Verfahren sind z.B.: Tiefziehen, Gesenkschmieden, Fließpressen (Abb. 1.5).
- *Verformen*: Ändern einer Form ohne Beherrschung der Geometrie, wie z.B. beim Schmieden von Hand mit Hammer und Amboss.

Abhängig vom eingesetzten Halbzeug (Blech, Stab oder Block) erfolgt eine Unterteilung in Blechumformung oder Massivumformung:

- *Blechumformung* (bis ca. 10 mm Blechdicke): Die Dicke des Blechs bleibt bis auf Änderungen zweiter Ordnung erhalten (s. Kap. 3).
- *Massivumformung*: Ein Körper wird in allen drei Koordinatenrichtungen verändert.

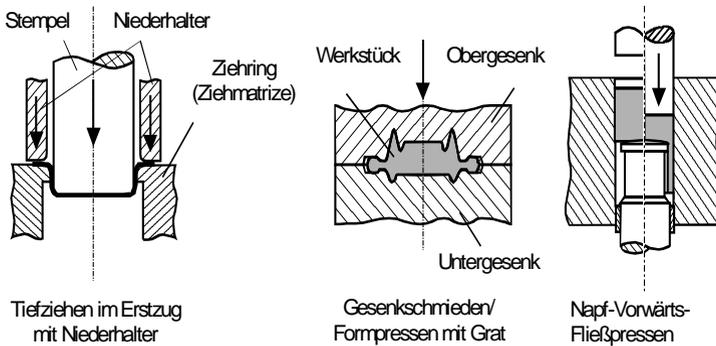


Abb. 1.5 Beispiele für Umformverfahren (nach /Lan88/)

Eine Einteilung der Umformverfahren kann auch hinsichtlich der Temperatur erfolgen (vgl. Tabelle 1.2). Dabei wird unterschieden zwischen:

- **Kaltumformung** (DIN 8582): Umformen ohne Anwärmen, d.h. bei einer Rohteiltemperatur von 20 °C. Aufgrund des begrenzten Formänderungsvermögens sind hohe Umformkräfte erforderlich. Es ist eine hohe Maßgenauigkeit erreichbar.
- **Halbwarmumformung**: Umformen nach Anwärmen, Rohteiltemperatur bei Stahl von 650 °C bis 900 °C. Durch eine Reduzierung der Zunderbildung und des Verzugs kann eine im Vergleich zur Warmumformung verbesserte Maßgenauigkeit erreicht werden. Verglichen mit der Kaltumformung sind geringere Umformkräfte erforderlich, gegenüber der Warmumformung ergeben sich jedoch etwa um den Faktor 2 bis 3 größere Kräfte /Ids03/.
- **Warmumformung** (DIN 8582): Umformen nach Anwärmen, Rohteiltemperatur bei Stahl von 1000 °C bis 1250 °C. Hierdurch ist die Kraft zur Umformung 8- bis 10-mal geringer als bei der Kaltumformung. Es sind sehr große Formänderungen erreichbar (Rohteiltemperatur > Rekristallisationstemperatur), allerdings reduziert sich die Maßgenauigkeit aufgrund von Schrumpfung, Verzug und Zunderbildung.

Kennzeichnend für alle Umformverfahren ist, dass Teile in der Regel nicht in einem, sondern in mehreren Arbeitsgängen hergestellt werden. Die Folge der einzelnen Arbeitsvorgänge wird als "Stadienfolge" bezeichnet: Daraus resultiert, dass die Herstellung von Werkstücken insbesondere durch Kaltumformung erst bei relativ großen Stückzahlen wirtschaftlich ist, da zur Fertigung eines Bauteils mehrere Werkzeugstufen notwendig sind.

1.2 Einteilung der Umformverfahren

1.2.1 Einteilung der Fertigungsverfahren nach DIN

Fertigungsverfahren werden nach DIN 8580 eingeteilt (Tabelle 1.4). Die Gliederung der sechs oben genannten Hauptgruppen ist in Tabelle 1.5 zu finden.

- *Urformen* ist Fertigen eines festen Körpers aus formlosem Stoff durch Schaffen eines Zusammenhaltes. Hierbei treten die Stoffeigenschaften bestimmbar in Erscheinung. Verfahren sind z.B. Gießen und Sintern.
- *Umformen* ist Fertigen durch bildsames (plastisches) Ändern der Form eines festen Körpers. Dabei werden sowohl die Masse als auch der Zusammenhalt beibehalten. Verfahren sind z.B. Blech- und Massivumformung.
- *Trennen* ist Fertigen durch Ändern der Form eines festen Körpers, wobei der Zusammenhalt örtlich vollständig aufgehoben wird. Dabei ist die Endform in der Ausgangsform enthalten. Auch das Zerlegen zusammengesetzter Körper wird dem *Trennen* zugeordnet. Verfahren sind z.B. das Drehen, Fräsen, Schleifen oder Bohren.
- *Fügen* ist das Zusammenbringen zweier oder mehrerer Werkstücke geometrisch bestimmter fester Form mit formlosem Stoff. Dabei wird der Zusammenhalt örtlich geschaffen oder im Ganzen vermehrt. Durch Kraft-, Stoff- oder Formschluss werden Einzelteile zu größeren Einheiten. Kraftschlüssige Verbindungen wie Schrauben sind lösbar, unlösbar sind formschlüssige Verbindungen wie Nieten oder Clinchen bzw. stoffschlüssige Verbindungen wie Schweißen und Löten.
- *Beschichten* ist das Aufbringen einer fest haftenden Schicht aus formlosem Stoff auf ein Werkstück. Verfahren sind z.B. Grundieren, Lackieren, Anstreichen, Emaillieren, Phosphatieren, Verzinken sowie das Aufbringen von keramischen Beschichtungen (vgl. Kap. 3.13). Es wird hauptsächlich zur Vorbereitung von Werkstücken für die Weiterverarbeitung, zur Verschleißreduzierung, zum Korrosionsschutz oder aus optischen Zwecken durchgeführt.

Tabelle 1.4 Einteilung der Fertigungsverfahren (nach DIN 8580)

		Zusammenhalt schaffen	Zusammenhalt beibehalten	Zusammenhalt vermindern	Zusammenhalt vermehren	
Änderung der	Form	Hauptgruppe 1	Hauptgruppe 2 <i>Umformen</i>	Hauptgruppe 3 <i>Trennen</i>	Hauptgruppe 4 <i>Fügen</i>	Hauptgruppe 5
	Stoffeigenschaft	<i>Urformen</i> (Form schaffen)	Hauptgruppe 6 <i>Stoffeigenschaft ändern</i> durch Umlagern von Stoffteilchen			Einbringen von Stoffteilchen
			Aussondern von Stoffteilchen			

- *Stoffeigenschaften ändern* ist das Fertigen eines festen Körpers durch Umlagern, Aussondern oder Einbringen von Stoffteilchen, wobei eine etwaige unwillkürliche Formänderung nicht zum Wesen des Verfahrens gehört. Beispielsweise werden durch gezieltes Ändern des Gefügestands eines Werkstoffes wie Härten oder Vergüten die Gebrauchseigenschaften eines Werkstücks hinsichtlich der Belastung im Einsatz nachträglich verbessert.

Tabelle 1.5 Gliederung der sechs Hauptgruppen der Fertigungsverfahren nach DIN 8580

Hauptgruppe 1 <i>Urformen</i>	Hauptgruppe 2 <i>Umformen</i> DIN 8582	Hauptgruppe 3 <i>Trennen</i>	Hauptgruppe 4 <i>Fügen</i>	Hauptgruppe 5 <i>Beschichten</i>	Hauptgruppe 6 <i>Stoffeigenschaft ändern</i>
Gruppe 1.1 aus dem gas- oder dampfförmigen Zustand	Gruppe 2.1 Druckumformen DIN 8583	Gruppe 3.1 Zerteilen	Gruppe 4.1 Zusammenlegen DIN 8593	Gruppe 5.1 aus dem gas- oder dampfförmigen Zustand	Gruppe 6.1 durch Umlagern von Stoffteilchen
Gruppe 1.2 aus dem flüssigen, breiigen oder pastenförmigen Zustand	Gruppe 2.2 Zugdruckumformen DIN 8584	Gruppe 3.2 Spanen mit geometrisch bestimmten Schneiden DIN 8589	Gruppe 4.2 Füllen DIN 8593	Gruppe 5.2 aus dem flüssigen, breiigen oder pastenförmigen Zustand	Gruppe 6.2 durch Aussondern von Stoffteilchen
Gruppe 1.3 aus dem ionisierten Zustand durch elektrolyt. Abscheiden	Gruppe 2.3 Zugumformen DIN 8585	Gruppe 3.3 Spanen mit geometrisch unbestimmten Schneiden DIN 8589	Gruppe 4.3 An- und Einpressen DIN 8593	Gruppe 5.3 aus dem ionisierten Zustand durch elektrolyt. o. chem. Abscheiden	Gruppe 6.3 durch Einbringen von Stoffteilchen
Gruppe 1.4 aus dem festen (körnigen o. pulverigen) Zustand	Gruppe 2.4 Biegeumformen DIN 8586	Gruppe 3.4 Abtragen DIN 8590	Gruppe 4.4 Fügen durch Urformen DIN 8593	Gruppe 5.4 aus dem festen (körnigen o. pulverigen) Zustand	
	Gruppe 2.5 Schubumformen DIN 8587	Gruppe 3.5 Zerlegen	Gruppe 4.5 Fügen durch Umformen DIN 8593		
		Gruppe 3.6 Reinigen	Gruppe 4.6 Stoffverbinden DIN 8593		
		Gruppe 3.7 Evakuieren			

Verfahrenskombinationen liegen dann vor, wenn jedes Verfahren für sich allein eine Bearbeitung des Werkstückes bewirkt.

1.2.2 Einteilung der Umformverfahren nach DIN

Umformverfahren der Hauptgruppe 2 aus DIN 8580 werden nach DIN 8582 weiter spezifiziert und nach dem herrschenden Spannungszustand eingeteilt (Abb. 1.6). Im Folgenden werden einige Beispiele für Umformverfahren zu den jeweiligen Spannungszuständen vorgestellt (Abb. 1.7 bis Abb. 1.11 nach /Lan88/).

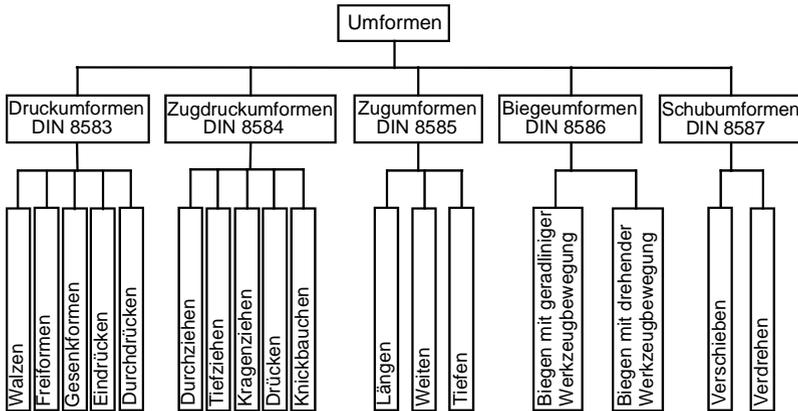


Abb. 1.6 Gliederung der 6 Hauptgruppen der Fertigungsverfahren (nach DIN 8582)

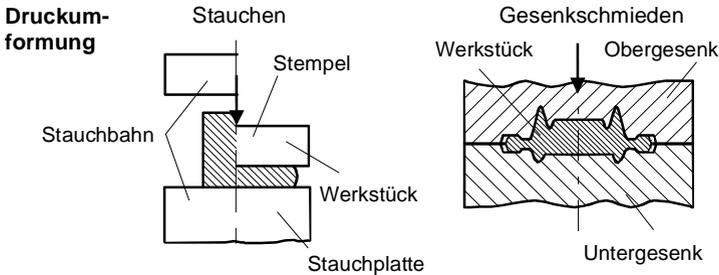


Abb. 1.7 Fertigungsverfahren Druckumformung (DIN 8583)

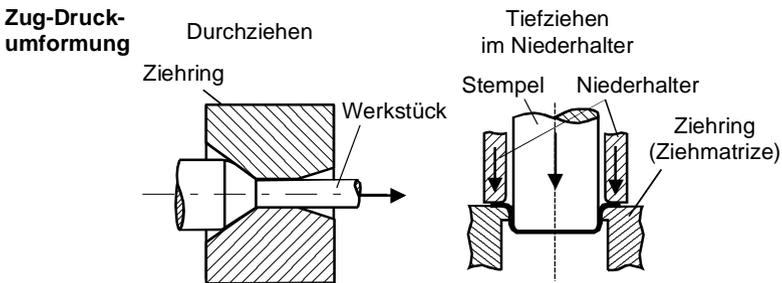


Abb. 1.8 Fertigungsverfahren Zugdruckumformung (DIN 8584)

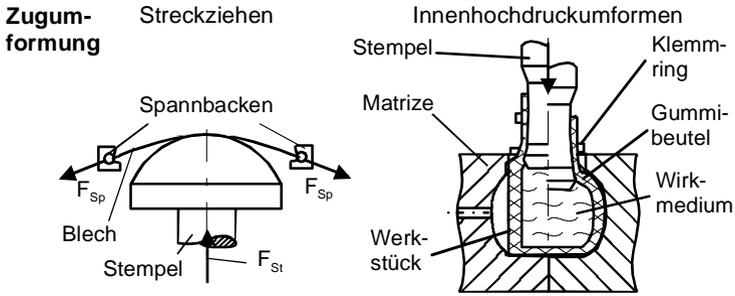


Abb. 1.9 Fertigungsverfahren Zugumformung (DIN 8585)

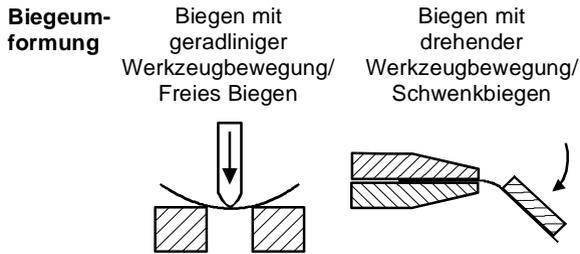


Abb. 1.10 Fertigungsverfahren Biegeumformung (DIN 8586)

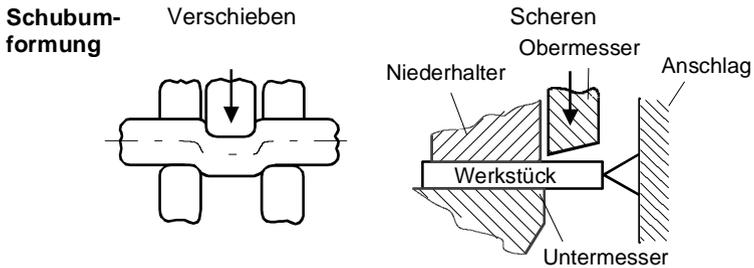


Abb. 1.11 Fertigungsverfahren Schubumformung (DIN 8587)

Literatur zu Kapitel 1

- /Ane99/ Anemüller UT (1999) Metallkundliche Untersuchungen an Bronzebeilen – ein Beitrag zur Technologie der Bronzezeit. Dissertation, Fortschritt-Berichte VDI, VDI Verlag GmbH, Düsseldorf
- /Her89/ Herlan T (1989) Optimaler Energieeinsatz bei der Fertigung durch Massivumformung. Dissertation Universität Stuttgart, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York London Paris Tokyo
- /Hir01/ Hirschvogel M (2001) Massivumformtechniken für die Fahrzeugindustrie. Verlag Moderne Industrie, Landsberg/Lech
- /Ids03/ www.ids.wsu.de (Stand 27.05.2003)
- /Joc94a/ Jockenhövel H (1994) Raum und Zeit – Gliederung der Bronzezeit. Bronzezeit in Deutschland, Konrad Theiss Verlag GmbH & Co., Stuttgart: 9–14
- /Joc94b/ Jockenhövel H (1994) Arbeiten an Ofen und Tiegel – Frühe Metallurgen und Künstler. Bronzezeit in Deutschland, Konrad Theiss Verlag GmbH & Co., Stuttgart: 36–40
- /Joc94c/ Jockenhövel H (1994) Geschlagen aus Blech – Frühe Bronzezeitgefäße. Bronzezeit in Deutschland, Konrad Theiss Verlag GmbH & Co., Stuttgart: 81–83
- /Joh53/ Johannsen O (1953) Geschichte des Eisens. Verlag Stahleisen mbH, Düsseldorf
- /Küh66/ Kühn H (1966) Vorgeschichte der Menschheit – Dritter Band – Bronzezeit und Eisenzeit. Verlag M. DuMont, Schauenberg Köln
- /Lan78/ Lange K (1978) Energieeinsparung und Fertigungstechnik. WT-Werkstattstechnik, Springer-Verlag, Band 68, Nr. 9: 535–537
- /Lan88/ Lange K (Hrsg.) (1988) Umformtechnik – Handbuch für Industrie und Wissenschaft, Bd. 1: Grundlagen. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York London Paris Tokyo
- /Lün05/ Lünen HB (2005) Technische Entwicklungen in der Stahlindustrie verringern CO₂-Emissionen. Fachkonferenz, Rheinklima – die Zukunftsfähigkeit europäischen Wirtschaftsraums im Wandel des Klimas, Bundesministerium für Bildung und Forschung, Bonn, 15.04.2005
- /Mon06/ Montelius O (1906) Kulturgeschichte Schwedens. Verlag von E. A. Seemann, Leipzig
- /Müh00/ Mühlendorfer B, Zeitler JP (2000) Mykene Nürnberg Stonehenge. Naturhistorische Gesellschaft Nürnberg e.V., Band 43
- /Spu91/ Spur G (1991) Vom Wandel der industriellen Welt durch Werkzeugmaschinen. Carl Hanser Verlag, München Wien
- /Wed58/ v. Wedel E (1958) Die geschichtliche Entwicklung des Umformens in Gesenken. Dissertation, TH Hannover
- /Wit43/ Witter W (1943) Über den Stand der Metallforschung (Kupfer und Bronze) im Dienst der Vorgeschichtswissenschaft. Nova Acta Leopoldina, Band 12, Nummer 82, Halle (Saale)
- /Zip67/ Zippe FXM (1967) Geschichte der Metalle. Dr. Martin Sändig oHG, Wiesbaden

Im Folgenden sind die charakteristischen Bereiche und Kennwerte des *Spannungs-Dehnungs-Diagramms* beschrieben.

- Die *Hookesche Gerade* (Abschnitt 0–1) gibt den Spannungsbereich an, den ein Werkstoff ertragen kann, ohne sich plastisch zu verformen. In diesem Bereich erfolgt lediglich eine elastische Dehnung des Werkstoffs.
- Das Ende der Hookeschen Geraden wird als *Streckgrenze* R_e bezeichnet.
- Die meisten reinen Metalle z.B. Al, Cu weisen jedoch keine ausgeprägte Streckgrenze auf, so dass hier die 0,2 % plastische *Dehngrenze* $R_{p0,2}$ definiert wird (die elastische Dehnung $\Delta\varepsilon_{el}$ ergibt sich hierbei aus der Gesamtdehnung bei $R_{p0,2}$ abzüglich 0,2 % plastischer Dehnung: $\Delta\varepsilon_{el} = \varepsilon_{Rp0,2} - 0,2\%$).
- Die Beanspruchung der Bauteile darf im Bereich der Elastizitätsrechnung die Streck-/Dehngrenze (Punkt 1), um einen Sicherheitsfaktor reduziert, nicht überschreiten.
- Bis zum Erreichen der *Zugfestigkeit* R_m (Höchstwert der Prüfkraft, Abschnitt 1–2), wird die Probe über die gesamte Länge ohne Einschnürung zusätzlich plastisch verformt. Dieser Bereich wird als *Gleichmaßdehnung* ε_{gl} bezeichnet.
- Danach beginnt die Probe, sich an einer Stelle einzuschnüren.
- Die weitere plastische Dehnung bis zum Bruch (Abschnitt 2–3) vollzieht sich dann nur noch im Bereich der Einschnürstelle. Hier wird von der *Bruchdehnung* A (Abschnitt 1–3) gesprochen.

Kennwerte für DC04:

$R_{p0,2}$ = 210 N/mm ² (Dehngrenze)	$\varepsilon_{gl} = A_g = 24,7\% = 0,247$ (Gleichmaßdehnung)
R_m = 320 N/mm ² (Zugfestigkeit)	$r = 1,5303$ (senkr. Anisotropie, Kap. 3.4)
A = 43,5 % (Bruchdehnung)	$\Delta r = 0,8705$ (ebene Anisotropie, Kap. 3.4)
Z = 64,3 % (Brucheinschnürung)	$n = 0,2242$ (Verfestigungsexponent, Kap. 3.4)
ε_{el} = 0,002 (elastische Dehnung)	$R_{p0,2}/R_m = 0,56$ (Streckgrenzenverhältnis)

Tabelle 2.1 Elastische und plastische Kennwerte unterschiedlicher Werkstoffe

Werkstoff	E-Modul [N/mm ²]	$R_{p0,2}$ [N/mm ²]	$\varepsilon_{gl} = A_g$
Magnesium (AZ31)	45000	180	0,085
X4CrNi18-10 (V2A)	200000	500	0,45
Nickel (Inconel 718)	212800	530	0,43
Aluminium (AA6016)	70000	110	0,22
Stahl H300X (DP500)	210000	300	0,16

elastischer Bereich		plastischer Bereich
$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (2.1)$		$k_f = \frac{F}{A} \quad (2.5)$
$A_0 = b_0 \cdot s_0 \quad (2.2)$		$A = b_1 \cdot s_1 \quad (2.6)$
$\varepsilon = \int_{l_0}^l \left(\frac{1}{l_0} \right) dl = \frac{l - l_0}{l_0} \quad (2.3)$		$\varphi = \int_{l_0}^l \left(\frac{1}{l} \right) dl = \ln l - \ln l_0 \quad (2.7)$
$\Rightarrow \boxed{\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}} \quad (2.4)$		$\Rightarrow \boxed{\varphi = \ln \frac{l}{l_0}} \quad (2.8)$
σ = Spannung [N/mm ²]		k_f = Formänderungsfestigkeit [N/mm ²]
F = Kraft [N]		F = Kraft [N]
A_0 = Ausgangsquerschnitt [mm ²]		A = jeweiliger Querschnitt [mm ²]
ε = elastische Dehnung		φ = logarithmische Formänderung

Die *elastische Dehnung* von z.B. DC04 beträgt ca. 0,1 % (Abb. 2.2), $\varepsilon = 0,001$. Nach der Entlastung im elastischen Bereich nimmt die Probe wieder ihre ursprüngliche Form an.

Der *plastische Bereich* für den Werkstoff DC04 (St 1403) ist bis zur Gleichmaßdehnung ε_{gl} nahezu 2500-mal größer als die elastische Dehnung. Die eingebrachte Formänderung ist hier bleibend, d.h., nach der Entlastung nimmt die Probe nicht wieder ihre ursprüngliche Form an.

Die *Fließkurve* (Abb. 2.3) beginnt am Ende der Hookeschen Geraden (mit Einsetzen des plastischen Fließens).

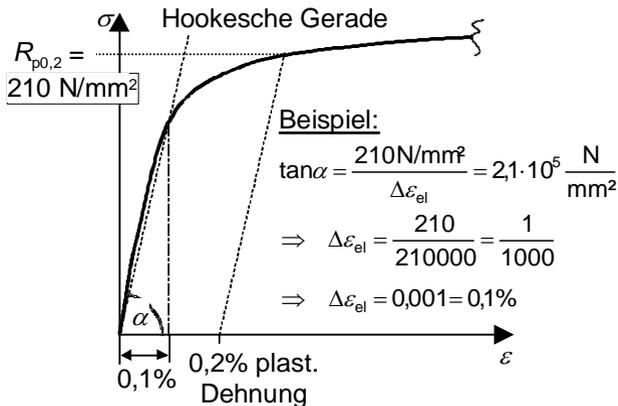


Abb. 2.2 Elastische Dehnung von DC04

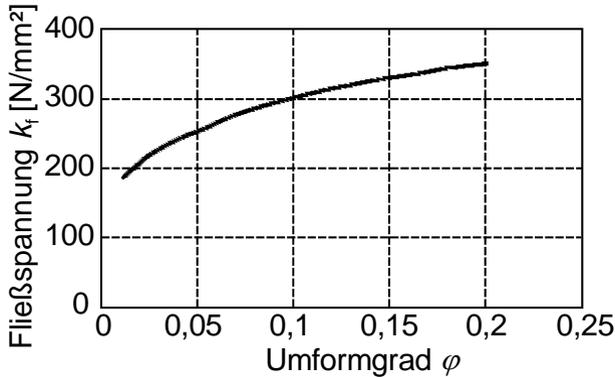


Abb. 2.3 Fließkurve für DC04 (St 1403) bei Raumtemperatur

2.1.1.2 Festigkeit – Duktilität

Der ideale Werkstoff für die Umformung sollte sich bis zu möglichst großen Formänderungen (*Duktilität*) mit geringen Kräften umformen lassen, ohne zu reißen, und dabei bestmögliche mechanische Eigenschaften besitzen (*Festigkeit*). Eine Steigerung der Festigkeit bedingt immer eine Reduktion der Duktilität (Gleichmaßdehnung $\varepsilon_{gl} = A_g$, Brucheinschnürung Z , Bruchdehnung A , Formänderungsvermögen φ_{max}) (Abb. 2.4).

Eine hohe Festigkeit bei gleichzeitig hoher Duktilität ist daher nur schwer einstellbar. Ein Werkstoff mit geringer Duktilität lässt sich umformtechnisch schwer verarbeiten.

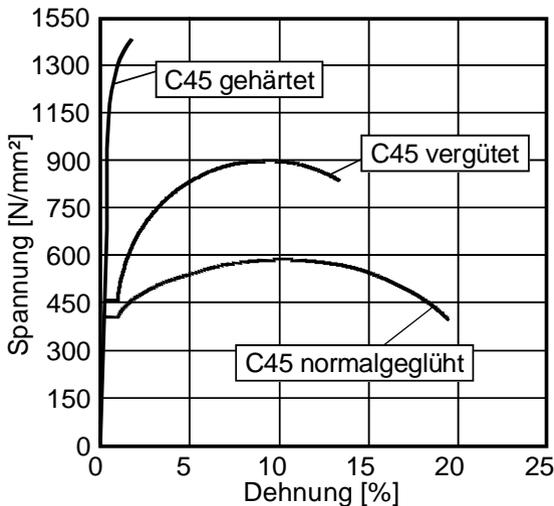


Abb. 2.4 σ - ε -Kurven für den Stahl C45 bei drei Behandlungszuständen (nach /Bar88/)

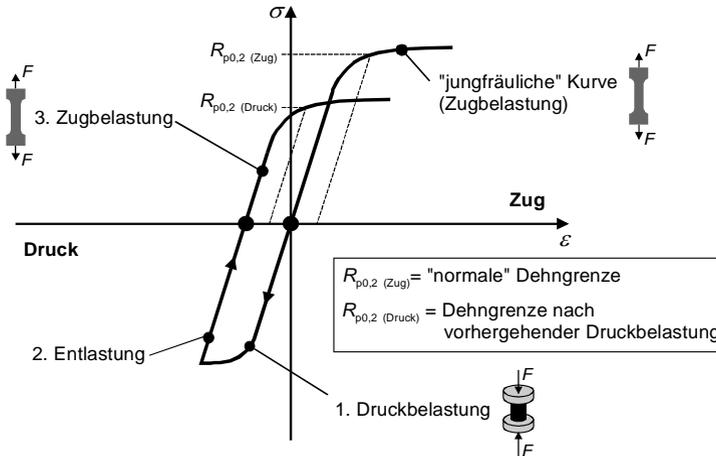


Abb. 2.5 Bauschinger-Effekt (nach /Bar88/)

Definition Bauschinger-Effekt

Eine vorangegangene Druckverformung führt bei anschließender Zugbeanspruchung zu einem früheren Beginn der plastischen Verformung einer Zugprobe (Abb. 2.5).

Ursache sind Eigenspannungen, die

- nach der Entlastung aufgrund ungleichmäßiger Verteilung der Werkstoffverformungen zurückbleiben und
- bei Umkehrung der Belastungsrichtung eine frühere Aktivierung von Versetzungsbewegungen bewirken.

Bei Zugbelastung einer zuvor druckbelasteten Probe ergibt sich eine Hysterese /Jän85/, die durch früheres Einsetzen der Krümmung der Spannungs-Dehnungs-Kurve abgebildet wird.

Definition Festigkeit

Festigkeit ist der Widerstand eines Körpers gegen Verformung und Bruch.

Bezogen auf die atomaren Bindungskräfte werden zwei theoretische Betrachtungen der Reaktion auf eine über die Elastizitätsgrenze hinaus gehende Belastung unterschieden (Abb. 2.6). Trennung ist das Reißen von überdehnten Bindungen zwischen Atomen des Gitters längs einer ganzen Gitterebene (*theoretische Zugfestigkeit* σ_{th}). Starres Abgleiten ist das Verschieben von Atomebenen gegeneinander (*theoretische Scherfestigkeit* τ_{th}). Im Folgenden werden die mathematischen Hintergründe der theoretischen Zug- und Scherfestigkeit erläutert.

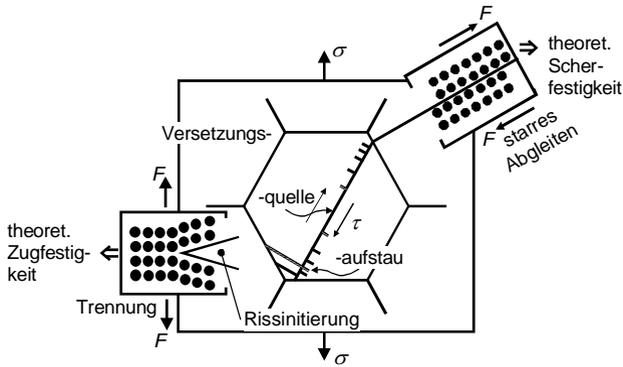


Abb. 2.6 Trennung und starres Abgleiten von Atomen

Theoretische Zugfestigkeit σ_{th} :

Die theoretische Zugfestigkeit σ_{th} ist die notwendige Spannung zur Trennung zweier Atomebenen entgegen ihrer Bindungskräfte, wobei alle Atome gleichzeitig senkrecht zur anliegenden Kraft F bzw. Spannung σ getrennt werden. Die Größe von σ_{th} folgt aus den Bindungsenergien im Kristallgitter. Der theoretische Wert liegt weit oberhalb des real auftretenden.

Die Spannungs-Abstandsbeziehung kann für kleine Auslenkungen durch eine lineare Funktion angenähert werden /Mül01/:

$$\sigma(x) = \sigma_{th} \cdot \sin\left(\frac{2\pi x}{\lambda}\right) \approx \sigma_{th} \frac{2\pi x}{\lambda}. \quad (2.9)$$

Im linearen Bereich gilt aber auch das folgende Hookesche Gesetz:

$$\sigma(x) = E \cdot \varepsilon = E \frac{x}{d}. \quad (2.10)$$

d : Gitterabstand

E : Elastizitätsmodul

ε : Dehnung

λ : Wellenlänge

x : Auslenkung

Hieraus folgt:

$$\sigma_{th} = \frac{E\lambda}{2\pi d}. \quad (2.11)$$

Es wird definiert, dass die zur Trennung der Atome notwendige Arbeit vollständig in Oberflächenenergie konvertiert wird.

D.h., sie ist gleich der spezifischen Oberflächenenergie γ_0 [J/m²] der beiden entstehenden Oberflächen:

Daraus ergibt sich:

$$2\gamma_0 = \sigma_{\text{th}} \frac{\lambda}{\pi}. \quad (2.12)$$

Hieraus folgt:

$$\sigma_{\text{th}} = \frac{E}{2\pi d} \frac{2\gamma_0\pi}{\sigma_{\text{th}}} \Rightarrow \sigma_{\text{th}} = \sqrt{\frac{\gamma_0 \cdot E}{d}}. \quad (2.13)$$

Die Berechnung von σ_{th} gestaltet sich schwierig, da das Messen der Oberflächenenergie $2\gamma_0$ Probleme bereitet. Daher erfolgt meist eine Abschätzung von σ_{th} mithilfe des E-Moduls:

Faustformel:

$$\frac{E}{5} > \sigma_{\text{th}} > \frac{E}{10} \quad (2.14)$$

Theoretische Scherfestigkeit/Schubspannung τ_{th} :

τ_{th} folgt aus der Verschiebung zweier benachbarter Gitterebenen (durch die aufgebrauchte Schubspannung τ) um den Weg x (Abb. 2.7). Infolge der Periodizität des Gitters ergibt sich in erster Näherung eine Sinusfunktion, d.h. die Schubspannung τ ändert sich sinusförmig.

$$\tau = \tau_{\text{th}} \cdot \sin\left(2\pi \cdot \frac{x}{a}\right) \quad (2.15)$$

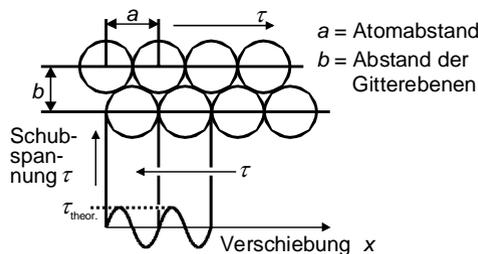


Abb. 2.7 Ableiten von Atomschichten (idealer Kristall)
Für kleine Werte von x gilt

$$\tau \approx \tau_{\text{th}} \cdot \left(2\pi \cdot \frac{x}{a} \right). \quad (2.16)$$

τ : Schubspannung x : Weg der Abgleitung/Verschiebung
 a : Atomabstand

Aus dem Hookeschen Gesetz folgt für τ

$$\tau = \gamma \cdot G = \frac{x}{b} \cdot G \quad (2.17)$$

$$\Rightarrow \tau_{\text{th}} = \frac{G \cdot a}{2\pi \cdot b}. \quad (2.18)$$

γ : Scherwinkel G : Schubmodul
 b : Gitterabstand

Für Metalle gilt $\frac{a}{b} = 1$.

$$\Rightarrow \tau_{\text{th}} = \frac{G}{2\pi} \approx \frac{G}{6} \quad (2.19)$$

Da $\tau_{\text{th}} \neq \tau_{\text{experimentell}}$ müssen neben dem starren Abgleiten noch andere Mechanismen wirken, z.B. das Wandern von Versetzungen (siehe Kap. 2.1.2.1).

Arten der Festigkeit

Man kann verschiedene Arten der Festigkeit (Kennwerte unterschiedlicher Prüfverfahren) unterscheiden. Es wird unterschieden in:

Standfestigkeit (statisch)

- a) Es liegt eine rein statische Beanspruchung vor:
Die Standfestigkeit eines Werkstoffs wird im Zugversuch ermittelt.
- b) Zeit- und temperaturabhängiges statisches Verformungsverhalten:
Die Zeitstandfestigkeit wird im Zeitstandversuch (Kriechkurve) ermittelt.

Schwingfestigkeit (dynamisch)

- c) Dauerfestigkeit eines Werkstoffs bei Anliegen einer sich zeitlich ändernden Beanspruchung:
Die Schwingfestigkeit wird im Dauerschwingversuch ermittelt.

a) Zugversuch

($F \neq \text{konst.}; v = \text{konst.}$)

Die Probe wird mit konstanter Geschwindigkeit $v_{\text{Belastung}}$ bis zum Bruch gedehnt (Abb. 2.8). Kennwerte zur Beschreibung der Festigkeit sind:

- Zugfestigkeit (R_m) und
- Dehn-/Streckgrenze ($R_{p0,2}/R_e$).

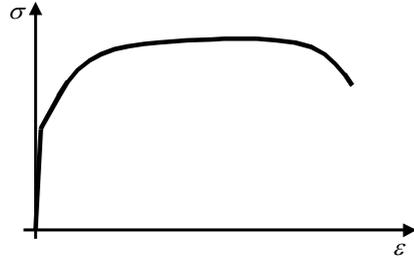


Abb. 2.8 Spannungs-Dehnungs-Diagramm (s. auch Abb. 2.1)

Einflussgrößen auf die Festigkeitswerte sind Temperatur und Prüfgeschwindigkeit:

- Temperatur:

Mit steigender Temperatur fallen die Festigkeitswerte ab (Abb. 2.9). Es kommt zur Unterdrückung einer eventuell vorhandenen ausgeprägten Streckgrenze.

Ausnahme Blausprödigkeit

Ist im Stahl ausreichend gelöster Stickstoff vorhanden, diffundiert dieser in die Versetzungsbereiche und blockiert die Versetzungen (*Alterung*). Der Stahl versprödet. Zwischen 200–300 °C ist die Diffusionsgeschwindigkeit der N-Atome so hoch, dass es bei solchen Stählen während der Verformung zur Versprödung kommt.

Dies führt zu einem Anstieg der Zugfestigkeit und Härte bei gleichzeitiger Abnahme der Dehnfähigkeit /Bar88, Dom86/. Eine weitere Erhöhung der Temperatur bewirkt auch hier eine zunehmende Entfestigung.

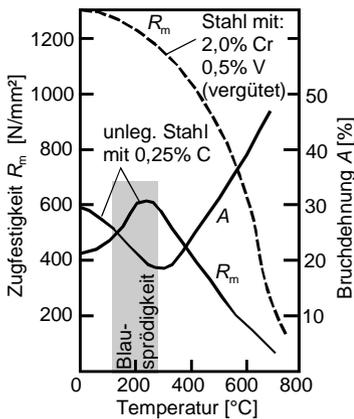


Abb. 2.9 Blausprödigkeit (nach /Dom86/)

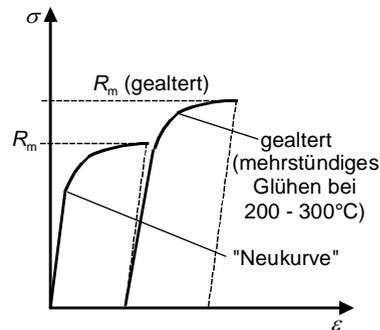


Abb. 2.10 Künstliche Alterung