

**de Gruyter Lehrbuch
Fritz Fischer
Spanlose Formgebung in Walzwerken**

Spanlose Formgebung in Walzwerken

von
Fritz Fischer

unter Mitarbeit von
Franz Gütlbauer und Martin Buch

mit 298 Abbildungen



Walter de Gruyter · Berlin · New York · 1972

©

by Walter de Gruyter & Co., vormals G. J. Göschen'sche Verlagshandlung, J. Guttentag,
Verlagsbuchhandlung, Georg Reimer, Karl J. Trübner, Veit & Comp., Berlin 30 –
Alle Rechte, einschl. der Rechte der Herstellung von Fotokopien und Mikrofilmen,
vom Verlag vorbehalten – Satz: Walter de Gruyter, Berlin, Druck: Georg Wagner, Nördlingen –
Printed in Germany

ISBN 3 11 001967 1

Vorwort

Im Jahre 1958 erschien im Rahmen der Göschen-Reihe der Doppelband „Walzwerke“ von Herrn Professor Sedlacek.

Die sehr freundliche Aufnahme bei Studierenden und in der Industrie veranlaßten den Verlag, das vorliegende Buch herauszugeben.

Es ist dem Andenken an Herrn Professor Sedlacek gewidmet.

Unter Beachtung der neueren Entwicklung soll sowohl dem Studierenden wie dem Praktiker ein Überblick über die spanlose Formgebung in Walzwerken vermittelt werden. Es wird versucht, in einfacher Darstellung die Vorgänge im plastischen Bereich zu betrachten und die grundsätzliche Arbeitsweise der verschiedenen Verformungsmaschinen aufzuzeigen. Der Verzicht auf eine vertiefte mathematische Behandlung ergab sich einmal aus der Zielsetzung des vorliegenden Buches, zum anderen aus der Tatsache, daß das beobachtbare Gesamtverhalten im plastischen Bereich in den meisten Fällen sehr komplexer Natur ist. Es wird bestimmt durch das Zusammenwirken vieler einzelner Komponenten, die sich zudem während des Formänderungsvorganges oft nicht konstant verhalten. Versuche, die Wirkweise und Größe der einzelnen beteiligten Komponenten durch eine Herauslösung gesondert zu betrachten, um dann anschließend additiv zu einer mathematisch eindeutigen Beschreibung zu gelangen, ist experimentell oft sehr schwierig. Ferner verhält sich die herausgelöste Komponente oft anders als im Verein mit mehreren bei gegenseitiger Wechselwirkung.

In der Praxis ist es daher oft sinnvoll, statt nach mathematisch exakten Gesetzmäßigkeiten, durch Beobachtung des Gesamtverhaltens beharrlich nach guten Regeln zu suchen, denen sich viele Erfahrungen unterordnen. Auf eingehend theoretisch-mathematisch ausgerichtetes Schrifttum ist im Literaturverzeichnis verwiesen.

München, im Februar 1972

Prof. Dr.-Ing. Fritz Fischer

Folgenden Firmen möchte ich sehr herzlich für wertvolle Beiträge und Bildmaterial danken:

Matthias Ludwig Industrieofenbau GmbH, Essen
Sundwiger Eisenhütte Maschinenfabrik Grah & Co., Hemer-Sundwig
Friedrich Kocks, Düsseldorf
Schloemann AG, Düsseldorf
Siemag Siegener Maschinenbau GmbH, Düsseldorf
Friedr. Krupp GmbH, Essen
Demag AG, Duisburg
Maschinenfabrik Sack GmbH, Düsseldorf-Rath
OFU Ofenbau-Union GmbH, Düsseldorf
Danieli & C. S. p. A., Buttrio, Italien
GFM, Steyr, Österreich
DELTA, Strasbourg-Eckbolsheim, Frankreich
Dillinger Hütte AG, Dillingen
Société Lorraine de Laminage Continu, Florange, Frankreich
Thyssen Hütte AG, Duisburg
Glöckner Werke AG, Duisburg
Hoesch AG, Dortmund
Karl Fr. Ungerer, Maschinenfabriken, Pforzheim

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	11
2. Allgemeine Grundlagen der spanlosen Formgebung	16
2.1 Elastische und plastische Formänderung	16
2.2 Vorgänge bei der plastischen Formänderung	20
2.3 Kräfte oder Spannungen bei plastischer Formänderung	29
3. Grundlagen des Walzens	34
3.1 Grundbegriffe	34
3.2 Wechselbeziehung zwischen Stauchung, Breitung und Längung	37
3.3 Kraftwirkung im Walzspalt	38
3.4 Fließscheide	40
3.5 Ermittlung der gedrückten Fläche	42
3.6 Berechnung des Formänderungswiderstandes	44
3.6.1 Der Formänderungswiderstand beim Warmwalzen	45
3.6.2 Der Formänderungswiderstand beim Kaltwalzen	48
3.7 Berechnung der Walzkraft	50
3.8 Berechnung des Walzendrehmomentes	51
3.9 Berechnung der Antriebsleistung	53
4. Grundbegriffe des Walzenkalibrierens	55
4.1 Die Kalibrierung von Blockwalzen	58
4.2 Die Kalibrierung von Halbzeugstraßen	60
4.3 Die Kalibrierung von Feinstahl- und Drahtstraßen	62
5. Das Walzgerüst	65
5.1 Walzenständer	65
5.2 Walzenlager	65
5.2.1 Gleitlager	66
5.2.2 Wälzlager	66
5.2.3 Ölflutlager	68
5.3 Einbaustücke	69
5.4 Die Walzen	70
5.5 Anstellung und Ausbalancierung	73
5.5.1 Anstellung	73
5.5.2 Ausbalancierung	75
5.6 Walzarmaturen, Dralleinrichtungen und Umführungen	76
5.6.1 Walzarmaturen	76
5.6.2 Dralleinrichtungen	78
5.6.3 Umführungen	79
5.7 Antriebs Elemente	81
5.8 Sohlplatten und Fundamente	84
5.9 Gebräuchliche Bauarten von Walzgerüsten	85
6. Hilfseinrichtungen und Adjustageeinrichtungen	87
6.1 Transporteinrichtungen	87
6.1.1 Rollgänge	87

6.1.2	Hebe- und Wipptische	88
6.1.3	Kant- und Verschiebevorrichtungen	89
6.1.4	Blockdrücker	91
6.1.5	Ein- und Ausstoßvorrichtungen	93
6.1.6	Blockkipper	93
6.1.7	Krane	93
6.1.8	Schlepper	95
6.1.9	Kühlbetten	95
6.1.10	Bundtransporteinrichtungen	96
6.2	Schneideeinrichtungen	96
6.2.1	Scheren	96
6.2.2	Sägen	100
6.3	Richtmaschinen	101
6.3.1	Richtpresse	101
6.3.2	Rollenrichtmaschine für Profile	101
6.3.3	Rollenrichtmaschine für Bleche	102
6.3.4	Schrägwalzenrichtmaschine	102
6.3.5	Streckrichtmaschine	104
6.4	Haspeleinrichtungen	105
6.4.1	Drahthaspeln	105
6.4.2	Bandhaspeln	109
7.	Warmwalzwerke	112
7.1	Block- und Brammenwalzwerke	112
7.1.1	Blockstraße	112
7.1.2	Brammenstraße	115
7.1.3	Hilfsmaschinen und Adjustageeinrichtungen	118
7.1.3.1	Rollgänge	121
7.1.3.2	Block-Brammenkipper	121
7.1.3.3	Flämmaschine	122
7.1.3.4	Block-Brammenscheren	122
7.1.4	Steuerung von Block-Brammenstraßen	128
7.2	Grob- und Mittelblechwalzwerke	128
7.2.1	Beispiele für ausgeführte Anlagen	132
7.2.2	Adjustageeinrichtungen	135
7.3	Warmbandwalzwerke	142
7.4	Die Planetenwalzwerke	153
7.5	Walzwerke zur Herstellung von schweren Profilen und Trägern	159
7.5.1	Schwere Profilstraßen	159
7.5.2	Universal-Trägerstraßen	160
7.5.3	Moderne Breitflanschträgerstraßen	163
7.6	Halbzeugwalzwerke	169
7.6.1	Offene und halbkontinuierliche Halbzeugstraßen	169
7.6.2	Kontinuierliche Halbzeugstraßen	172
7.6.3	Neuartige Verformungsmaschinen	180
7.6.3.1	Kocks-Schwingmaschine	180
7.6.3.2	GFM-Durchlaufschmiedemaschine	181
7.6.3.3	Schloemann-Exzenterwalzwerk	182
7.7	Feinstahl- und Drahtwalzwerke	184
7.7.1	Offene und halbkontinuierliche Feinstahl- und Drahtstraßen	184
7.7.2	Kontinuierliche Stahldrahtstraßen	187

7.7.2.1	Drahtstraßen mit Horizontal-Vertikal-Anordnung der aufeinander folgenden Walzenpaare in der Fertigstraße . . .	189
7.7.2.2	Drahtstraßen mit nur horizontaler Walzenanordnung – Fertigstraße in Blockbauweise	191
7.7.2.3	Drahtstraßen mit Horizontal-Vertikal-Anordnung der aufeinanderfolgenden Walzenpaare in der Fertigstraße – 45° Blockweise mit fliegender Lagerung der Walzen	191
7.7.2.4	Drahtstraßen mit Horizontal-Vertikal-Anordnung der aufeinanderfolgenden Walzenpaare – 45° Blockbauweise mit beiderseitiger Lagerung der Walzen	194
7.7.2.5	Drahtstraßen mit Drei-Walzen-Gerüsten – Blockbauweise mit beiderseitiger Lagerung der Walzen	196
7.7.3	Einrichtungen zum Abkühlen des Drahtes aus der Walzhitze	196
7.7.4	Kontinuierliche Feinstahlstraßen – 1	200
7.7.5	Einstichwalzwerk	206
7.7.6	NE-Metalldrahtstraßen	207
7.7.6.1	Kupferdrahtstraßen	208
7.7.6.2	Aluminium-Drahtwalzwerk mit kontinuierlicher Gießbrad-anlage	209
8.	Wärmöfen für Walzwerke	215
8.1	Einsatzöfen	215
8.1.1	Einsatzöfen mit festem Herd	215
8.1.1.1	Großraumtieföfen	216
8.1.1.2	Zellentieföfen	217
8.1.1.3	Elektrisch beheizte Tieföfen	217
8.1.2	Einsatzöfen mit fahrbarem Herd	219
8.2	Durchlauföfen	219
8.2.1	Stoßöfen	221
8.2.2	Hubwagenöfen	221
8.2.3	Drehherdöfen	225
8.2.4	Rollenherdöfen	227
9.	Kaltwalzwerke	232
9.1	Entzunderung des warmgewalzten Bandes	235
9.2	Kaltwalzen	239
9.2.1	Gebräuchliche Gerüstbauarten	239
9.2.1.1	Zweiwalzengerüst	239
9.2.1.2	Dreiwälzengerüst	239
9.2.1.3	Vierwalzengerüst	240
9.2.1.4	MKW-Kaltwalzgerüst	242
9.2.1.5	Vielrollenwalzgerüste	243
9.2.1.5.1	Kipprahmenbauart nach Dr. Rohn	245
9.2.1.5.2	Sendzimir-Zwanzigrollenwalzgerüst	246
9.2.1.5.3	Viersäulenbauart nach Sundwig	248
9.2.2	Ausgeführte Anlagen	249
9.2.2.1	Kaltbandstraßen für unlegierte Stähle und NE-Metalle	249
9.2.2.2	Anlagen zur Herstellung kaltgewalzten rostfreien Stahlbandes	252
9.2.3	Regeleinrichtungen zur Erzielung engster Banddickentoleranzen	254
9.3	Wärmebehandlungsanlagen	257
9.3.1	Satzweise arbeitende Öfen	257

9.3.1.1	Haubenöfen	260
9.3.1.1.1	Einstapel-Haubenöfen	260
9.3.1.1.2	Mehrstapel-Haubenöfen	263
9.3.1.1.3	Einstapelöfen zum Glühen offen gewickelter Bunde	264
9.3.1.2	Topföfen	265
9.3.1.3	Kammeröfen	266
9.3.2	Durchlaufend arbeitende Öfen	266
9.3.2.1	Rollenherdöfen für Bandbunde	268
9.3.2.2	Durchziehöfen für Bänder	268
9.3.2.2.1	Durchziehöfen für Bänder mit waagerechtem Bandlauf, einwegig und mehrwegig	269
9.3.2.2.2	Durchziehöfen für Bänder mit senkrechtem Bandlauf, einwegig und mehrwegig	270
9.4	Veredelungsanlagen	271
9.5	Hilfsmaschinen und Adjustageeinrichtungen	273
9.5.1	Besäum- und Umwickelanlagen	273
9.5.2	Bandspaltanlagen	276
9.5.3	Querteilanlagen	278
10.	Rohrwerksanlagen	281
10.1	Anlagen zur Herstellung nahtloser Rohre	281
10.1.1	Anlagen zur Herstellung der Luppen	281
10.1.1.1	Schrägwalzwerke	281
10.1.1.2	Lochpressen	284
10.1.1.3	Gießen	285
10.1.2	Anlagen zur Erzeugung des Mutterrohres	285
10.1.2.1	Duo-Stopfenstraße	285
10.1.2.2	Rohrkontiststraße	286
10.1.2.3	Pilgerstraße	287
10.1.2.4	Rohrstoßbankanlage	288
10.1.2.5	Rohrstrangpressen	289
10.1.3	Anlagen zur Erzeugung von Fertigrohren	290
10.2	Anlagen zur Herstellung geschweißter Rohre	296
10.3	Rohradjustageeinrichtungen	300
	Literaturverzeichnis	303
	Sachverzeichnis	315

1. Einleitung

Die Walzwerkerei in ihrer heutigen Bedeutung als Formgebungsverfahren für die Verarbeitung großer Werkstoffmengen sowie zur Herstellung des Ausgangsmaterials für viele andere Arten der Umformtechnik besitzt eine Entwicklungsgeschichte, deren nachweislicher Beginn im 16. Jahrhundert liegen dürfte. Vorausgestellt seien Skizzen von Leonardo da Vinci aus dem Jahre 1492 (Bild 1a und b).

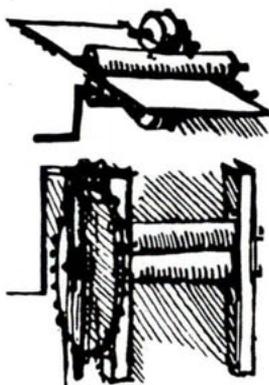


Bild 1a Handbetriebene Walzwerke

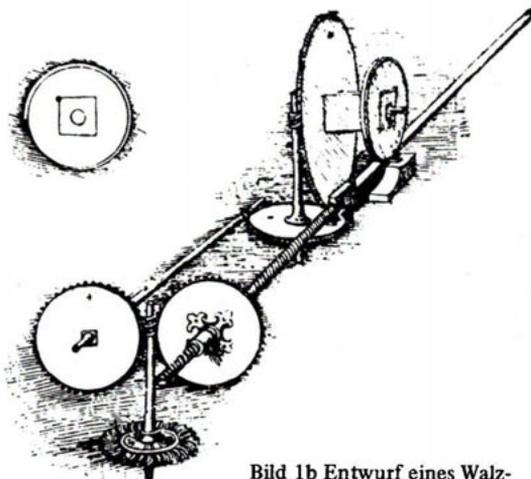


Bild 1b Entwurf eines Walz- und Ziehwerkes

Von den unbedeutenden Anfängen dieser Zeit bis zu den elektronisch gesteuerten Walzenstraßen von heute wurden dabei die großen Entwicklungsstufen immer mitbestimmt vom Entwicklungsstand der Walzantriebe.

In chronologischer Reihenfolge seien hier die Kraftquellen genannt, die, wenn sie sich in ihrem Wirkungsbereich als Walzwerksantriebe ablösten, jedesmal einen starken Aufschwung in der Entwicklung herbeiführten.

Es sind dies

Handkraft	(1492)
Wasser- und Göpelkraft	(1575)
Dampfkraft	(1784)
elektromotorische Kraft	(seit etwa 1900)

Die Ablösung der Handarbeit durch Göpel- und Wasserantrieb bedeutete zugleich den Übergang in der Walzwerkerei vom Handwerk zum Fabrikbetrieb (Bild 2). Die eigentliche Grundlage für die heutige Bedeutung des Walzwerkswesens wurde jedoch mit der Erfindung des Puddel-Verfahrens einerseits und der Dampfmaschi-

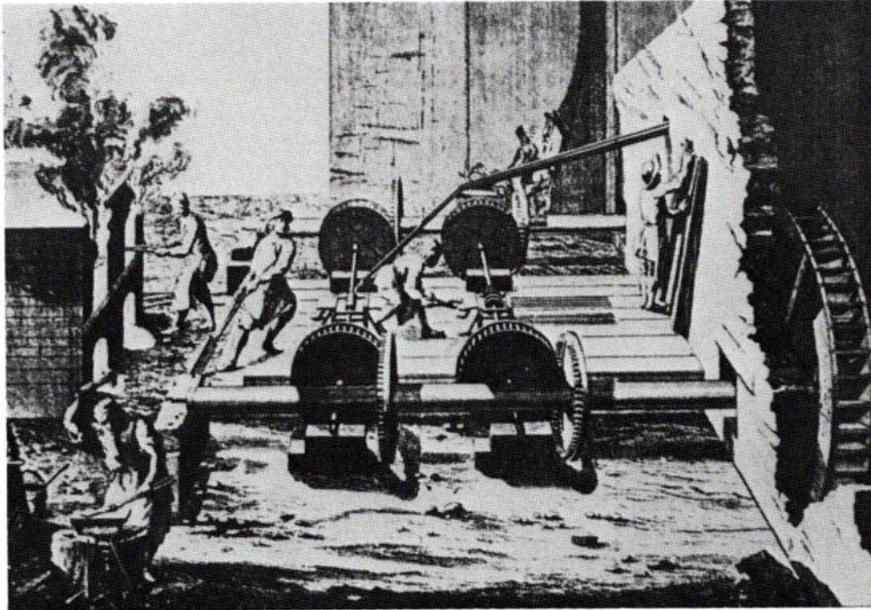


Bild 2 Eisenwalz- und -schneidwerk

ne als Walzwerksantrieb andererseits geschaffen. Im Jahre 1784 wurde in England das erste Dampfwalzwerk erbaut (Bild 3).

Diese Bauart war jedoch bald überholt, und die Entwicklung der Eisenbahn mit ihrem Schienenbedarf wurde zum Ausgangspunkt von immer größeren Walzwerken auf dem europäischen Kontinent.

Man erkannte nun auch, daß eine grundsätzliche Verbesserung der bisherigen Walzverfahren nur dadurch herbeigeführt werden konnte, daß man das Walzgut im Vor- und Rückwärtsgang bearbeitete.

Dieses Vor- und Rückwärtswalzen bedeutete jedoch zunächst ein großes Problem, da man der Umsteuerung der Dampfmaschine damals noch hilflos gegenüberstand und eine Lösung durch Reversierkupplungen zu finden hoffte. Unzählige Vorschläge und Konstruktionen brachten keine befriedigende Lösung und stellten immer Kompromisse dar. Erst als im Jahre 1863 dem Engländer *Ramsbottom* erstmalig der Bau einer umsteuerbaren Walzenzugmaschine gelang, war dieses Problem gelöst (Bild 4).

Alle Dampfmaschinen dieser Art hatten jedoch einen sehr großen Dampfverbrauch, der einen empfindlichen Nachteil bedeutete. Erst durch die Erfindung und den Bau von Verbund-Umkehrmaschinen konnte dieser Nachteil gemindert

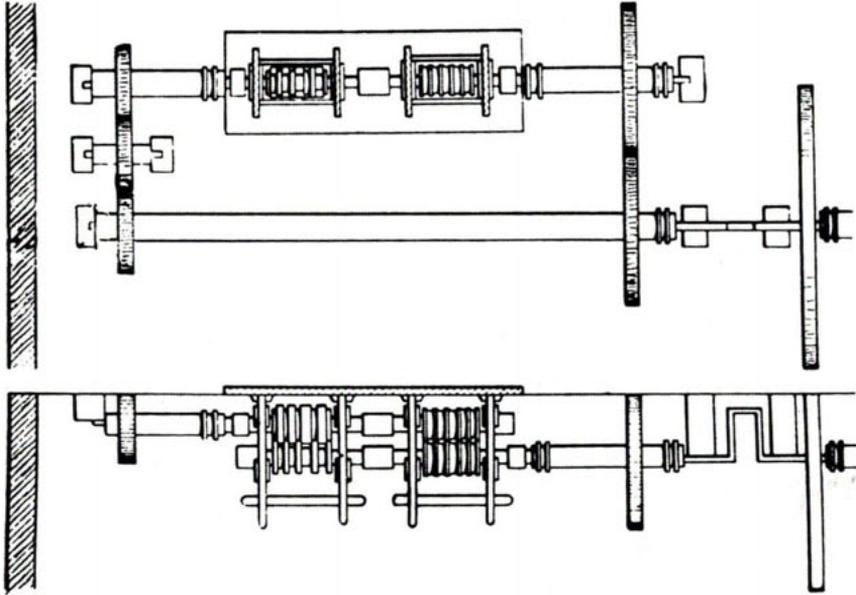


Bild 3 Puddelwalzwerk

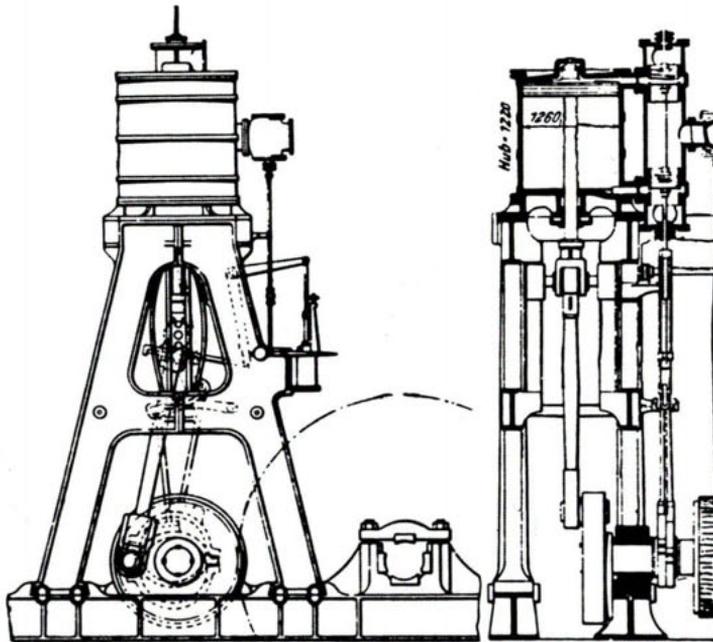


Bild 4 Dampfmaschine mit Hilfsdampfzylinder zum Antrieb der Walzwerke

und schließlich behoben werden. Ferner konnte die Regelbarkeit verbessert und eine gleichmäßige Drehmomentabgabe erzielt werden (Bild 5).

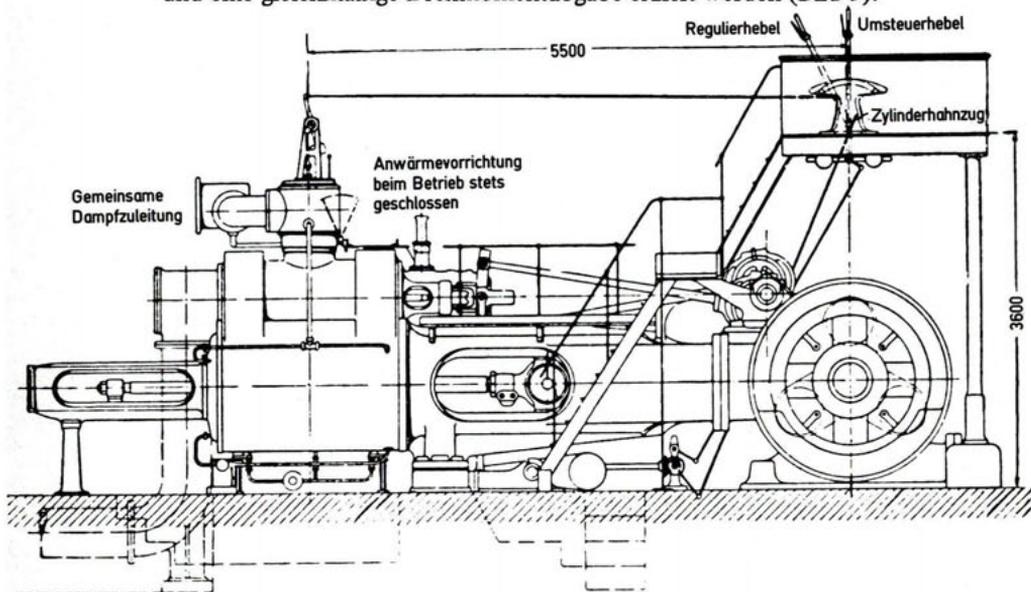


Bild 5 Drillingsdampfmaschine von Ehrhardt

Mit der Erfindung eines Stauventils endlich, das beim Umsteuern ein Zurückströmen des Dampfes aus dem Zwischenbehälter verhinderte, war das Problem des Umkehrwalzwerks praktisch gelöst.

Während die Dampfmaschine als Walzwerksantrieb nunmehr befriedigend arbeitete, war sie für die Betätigung von Anstellung, Rollgängen usw. doch sehr umständlich und schwierig (Platzbedarf, Dampfzuleitungen usw.).

Hier brachte im Jahre 1891 die erste elektrotechnische Ausstellung in Frankfurt/Main die große Wende und war zugleich Anstoß, der Dampfmaschine den Walzwerksantrieb bald streitig zu machen.

Ähnlich wie beim Dampfwalzwerk bereitete der elektrische Antrieb von Umkehrwalzwerken lange Zeit sehr große Schwierigkeiten. Erst *Carl Ilgner* konnte dieses Problem durch Anwendung der Leonard-Schaltung lösen (Bild 6). (Bild 6).

Die Besonderheit dieses Verfahrens besteht darin, durch Regelung des relativ kleinen Erregerstroms des Generators G 1 den Strom für den Motor M 2 und damit seine Drehzahl beeinflussen zu können. Der Erregerstrom von M 2 selbst bleibt meistens konstant.

Als die erste Walzenstraße mit Ilgner-Antrieb 1906 auf der Hildegard-Hütte in Trzynietz in Betrieb ging, hatte die Elektrizität entscheidend über den Dampf

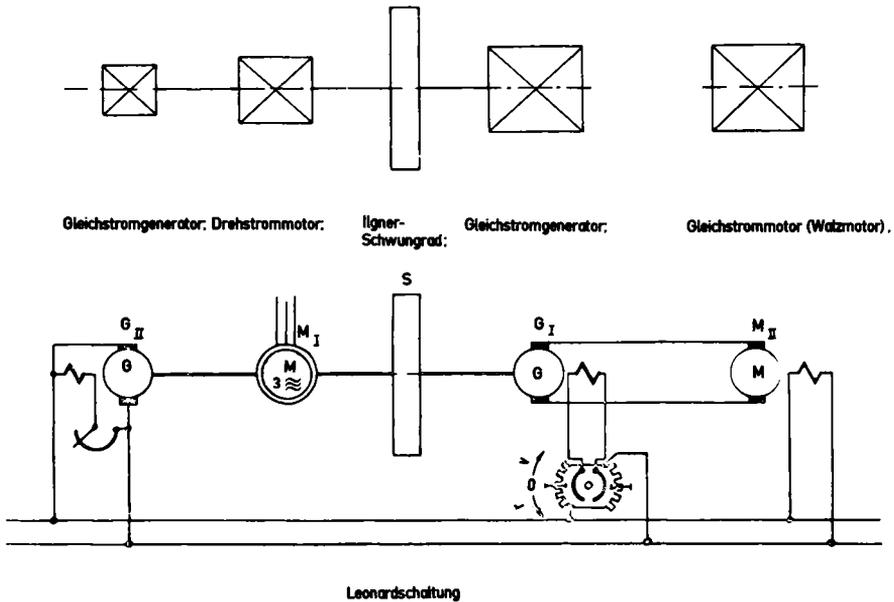


Bild 6 Leonardschaltung

gesiegt. In neuester Zeit wird eine Steuerung der Walzwerksmotoren mit Stromrichtern vorgenommen. Der hohe Entwicklungsstand und die wirtschaftlichen Vorteile legten es nahe, sie für diese Aufgabe heranzuziehen.

Abschließend sei noch auf die Entwicklung elektrischer Steueranlagen hingewiesen, die einen selbsttätigen Wirkungsablauf ermöglichen. Dadurch kann man Arbeitsprozesse sehr schnell und genau steuern, wie es Unzulänglichkeiten menschlicher Reaktion nicht zulassen würden. Ihre Entwicklung ist noch in stetigem Fluß.

Während die Entwicklungsgeschichte der Walzwerkerei bis ins frühe Mittelalter zurückgeht, begann die wissenschaftliche Untersuchung über den Walzvorgang mit seinen Einwirkungen auf das Walzgut kurz vor Anfang unseres Jahrhunderts. Zu einer theoretischen Analyse der Vorgänge im Walzspalt ist es zunächst erforderlich, Klarheit über die Kräfte und Spannungen, die eine plastische Formänderung bewirken, zu schaffen. Ausgehend von dem Wissen um die Vorgänge, die die plastische Verformung bewirken, wurden verschiedene Ansätze und Theorien über die Kräfte im Walzspalt aufgestellt. Trotz sehr eingehender und weitführender theoretischer Arbeiten ist jedoch bis heute die Kenntnis um die Walzvorgänge aus theoretischer Sicht noch lückenhaft. Insbesondere besteht für geeignete mathematische Ansätze eine große Schwierigkeit darin, daß sämtliche Einflußgrößen sich mit einer Veränderung bestimmter Walzbedingungen selbst verändern und so keinen festen Ansatzpunkt bieten.

2. Allgemeine Grundlagen der spanlosen Formgebung

2.1. Elastische und plastische Formänderung

Ganz allgemein versteht man unter spanloser Formgebung einen Arbeitsvorgang, in dem unter dem Einfluß äußerer Kräfte eine Veränderung der ursprünglichen Gestalt oder Form eines Körpers erzwungen wird. Eine solche Formänderung kann sowohl *elastisch* als auch *plastisch* sein. Elastische Formänderung bedeutet, daß sich die erzielte Form nach Wegnahme der deformierenden Kräfte in die Ausgangsform zurückbildet. Bei einer plastischen Formänderung bleibt die unter Krafteinwirkung entstandene neue Form des Körpers nach Wegnahme der Kraft völlig oder zum Teil erhalten. Bild 7 zeigt diese Situation schematisch.

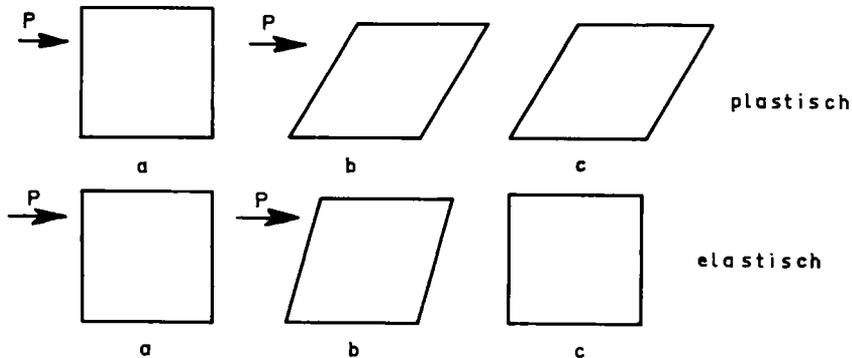


Bild 7 Schematische Darstellung von plastischer und elastischer Formänderung

Die Wirkung von äußeren Kräften auf den bildsamen Zustand von Metallen kann durch einen Zugversuch und das ihm zugeordnete Kraft-Weg-Diagramm anschaulich gezeigt werden. Führt man einen solchen Zugversuch in mehreren Stufen durch, wobei in jeder Stufe be- und entlastet und die Kraft von Stufe zu Stufe gesteigert wird, kann man im Rahmen des ganzen Versuchs drei charakteristische Bereiche erkennen:

1. In den ersten Abschnitten des Versuchs tritt eine Veränderung des Stabes (Verlängerung) ein, die jedoch nach Wegnahme der Kraft wieder völlig verschwindet oder aber nicht meßbar ist. Dies ist der Bereich der rein *elastischen Formänderung*.
2. Bei einer bestimmten Größe der Kraft bleibt von der unter Krafteinwirkung erfolgten Formänderung (Verlängerung) nach Entlastung ein meßbarer Anteil erhalten. Der Probestab hat neben der elastischen eine plastische Veränderung erfahren.

3. Bei weiterer Kraftsteigerung tritt eine sehr starke Formänderung des Probestabes auf, die nach Entlastung völlig erhalten bleibt oder aber deren elastische Rückänderung nicht mehr meßbar ist. Hier handelt es sich um das Gebiet der rein *plastischen Formänderung*. Formänderungsvorgänge in diesem Gebiet werden mit *Fließen* bezeichnet.

Bild 8 zeigt die Verhältnisse schematisch.

Die Verhältnisse des Bereiches 1) werden durch das *Hooke'sche* Gesetz beschrieben, das aussagt, daß die Dehnung des Körpers proportional der angelegten Spannung ist:

$$\epsilon = \sigma \cdot \alpha \quad (1)$$

ϵ = Verlängerung des Probestabes im Verhältnis zu seiner ursprünglichen Länge, d. i. $\frac{\Delta L}{L}$. Damit wird ϵ zu einer dimensionslosen Zahl.

σ (mm²/kp) = angelegte Zug- oder Druckspannung

α (kp/mm²) = stoffabhängige Konstante

Der Zusammenhang zwischen α und dem Elastizitätsmodul ist durch folgende Beziehung gegeben:

$$E = \frac{1}{\alpha} \quad (2)$$

E (kp/mm²) = Elastizitätsmodul

Nachfolgend ist der E-Modul für verschieden Werkstoffe angegeben:

Aluminium	6750 kp/mm ²
Blei	1600 kp/mm ²
Eisen (rein)	21550 kp/mm ²
Kupfer	12500 kp/mm ²
Molybdän	33630 kp/mm ²
Nickel	19700 kp/mm ²
Stahl C 15	20800 kp/mm ²
Stahl C 35	20600 kp/mm ²
Stahl C 60	20400 kp/mm ²
X 10 Cr 13	22000 kp/mm ²
X 12 Cr Ni 188	19500 kp/mm ²
Tantal	18820 kp/mm ²
Titan	10520 kp/mm ²
Vanadium	15000 kp/mm ²
Wolfram	41530 kp/mm ²
Zink	9400 kp/mm ²
Zinn	5500 kp/mm ²
Zirkon	6970 kp/mm ²

Der Elastizitätsmodul ändert sich bei den meisten Werkstoffen mit der Temperatur, der Wärmebehandlung und dem Verformungszustand.

Zur Kennzeichnung des Übergangs von Bereich 1) nach 3) (elastisch → plastisch) dient der Begriff der Streckgrenze. *Die Streckgrenze* ist der Punkt, an dem das Hooke'sche Gesetz seine Gültigkeit verliert. Da jedoch dieser Punkt nicht bei allen Metallen eindeutig erkennbar ist, wurde vereinbart, die sogenannte *0,2-Dehngrenze* ($\sigma_{0,2}$ -Grenze) einzuführen. Hierbei wird angegeben, wo bei Be- und Entlastung eines Probestabes eine bleibende Dehnung von 0,2 % erhalten wird (Bild 8).

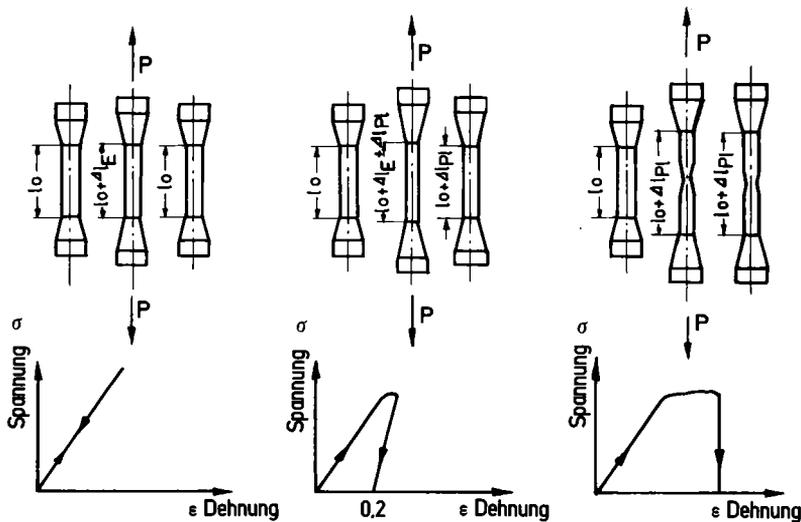


Bild 8 Schema: Spannungs-Dehnungs-Diagramme

Die Verhältnisse des plastischen Zustandes können nicht durch ein dem Hooke'schen ähnliches, klar formuliertes Gesetz beschrieben werden. Einmal besteht kein einfacher Zusammenhang mehr zwischen Formänderung und Spannung wie bei der elastischen Verformung, zum anderen ändert sich die Grundform des Körpers bei der plastischen Verformung.

Im Zerreißversuch beobachtet man deutlich die im plastischen Bereich erfolgende Querschnittsveränderung (Einschnürung) des Stabes. Aus diesem Grunde werden in einem zugehörigen Spannungs-Dehnungs-Schaubild die Spannungsänderungen im plastischen Bereich nur scheinbar richtig gezeigt, da sie auf den Ausgangsquerschnitt bezogen sind (Bild 9). Würde man die wirkliche Spannung über der Dehnung auftragen, d. h. den jeweils im plastischen Bereich gerade

vorliegenden Querschnitt berücksichtigen, so ergäbe sich ein abweichendes Spannungs-Dehnungs-Schaubild, wie es in Bild 10 gegenüberstellend gezeigt wird. Diese Kurve der wirklichen Spannung nennt man *Fließkurve*.

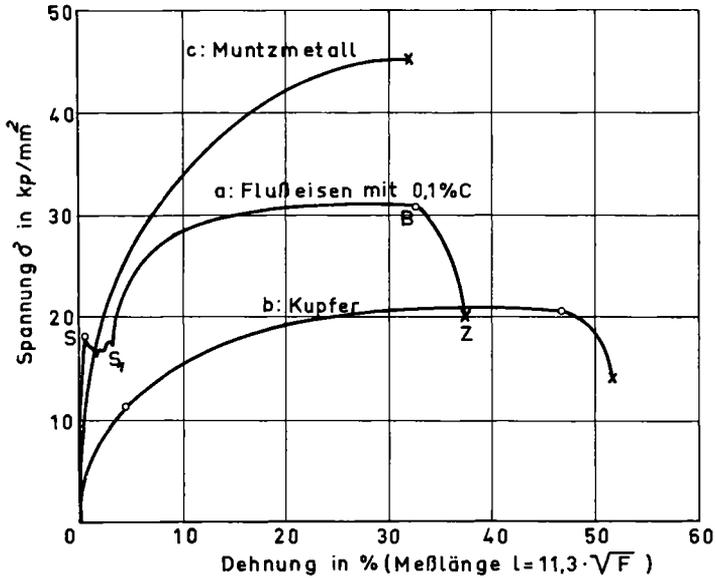


Bild 9 Spannungs-Dehnungs-Diagramm verschiedener Werkstoffe

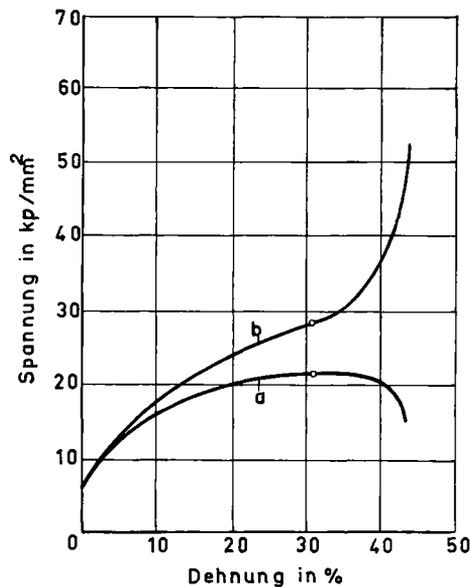


Bild 10 Zerreißkurve
 a) scheinbare Spannungsänderung b) wirkliche Spannungsänderung (Fließkurve)

2.2. Vorgänge bei der plastischen Formänderung

Im festen Zustand liegen alle Metalle in kristalliner Form vor. Dies bedeutet, daß die Atome den Körper nach bestimmter Gesetzmäßigkeit und Ordnung aufbauen. Das kleinste Bauelement eines Kristalls nennt man *Elementarzelle*. Sie ist der kleinste Baustein, der das Ordnungsprinzip, das den gesamten Kristall beherrscht, ausweist.

In den Metallen findet man meist drei Grundformen der Elementarzelle, und zwar die kubische, die tetragonale und die hexagonale. Die einfache kubische Elementarzelle wird durch acht Atome gebildet, die in den Ecken eines Würfels sitzen. Liegt im Zentrum dieses Würfels, d. h. im Schnittpunkt der Raumdiagonalen, noch zusätzlich ein Atom, spricht man von einer kubisch raumzentrierten Struktur. Liegen dagegen zusätzliche Atome in den diagonalen Schnittpunkten der Würfelflächen, spricht man von einer kubisch flächenzentrierten Anordnung. Bild 11 zeigt die verschiedenen Typen der Elementarzelle. In Bild 12a und b ist die Elementarzelle der kubisch raumzentrierten und der kubisch flächenzentrierten Ordnung in Form von einander fast berührenden Kugeln dargestellt. Ein solches Bild dürfte dabei dem wirklichen Zustand im Kristall am nächsten kommen.

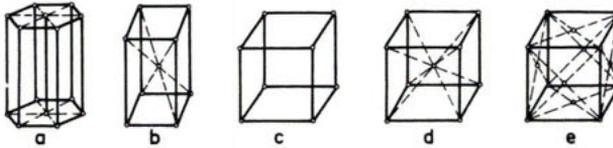


Bild 11 Gitteraufbau der Elementarzellen
a) hexagonal b) tetragonal c, d und e) kubisch

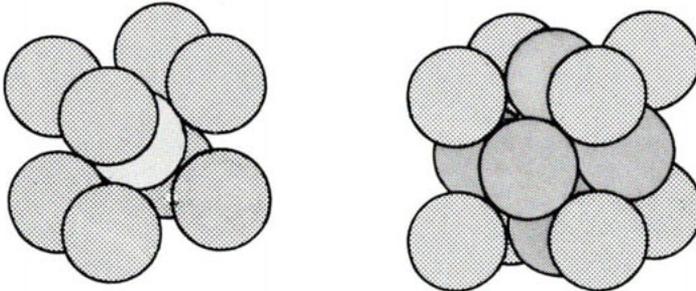


Bild 12a und b Kubisch raumzentrierte und kubisch flächenzentrierte Ordnung

In Bild 13 ist ein größerer Kristallbereich gezeigt, der sich aus kubischen Elementarzellen aufbaut. Die gedachten Linien, die die Mittelpunkte der Atome miteinander verbinden, bilden ein Gitter, das sogenannte *Atomgitter*. Im Raum wiederholen sich die parallel zueinanderliegenden Gitterebenen immer wieder und bilden so das *Raumgitter*. Durch die Lage der Atome, ihren gegenseitigen Abstand und die Dichte ihrer Verteilung im Gitter werden u. a. die mechanischen und physikalischen Eigenschaften der Metalle bestimmt. Hierdurch wird verständlich, daß ein Kristall in unterschiedlichen Gitterebenen verschiedenartige Eigenschaften aufweist. Die Eigenschaften eines Kristalls sind dadurch richtungsabhängig oder *anisotrop*.

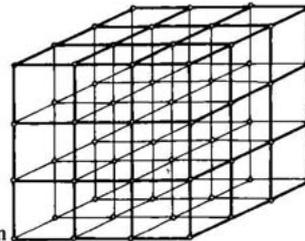


Bild 13 Größerer Kristallbereich kubischer Elementarzellen

Während die elastische Formänderung in einer rückläufigen Verzerrung des Gitters besteht, werden bei der plastischen Verformung die Bestandteile der Elementarzelle und damit durch deren geordneten Zusammenhang ganze Gitterbereiche gegeneinander um endliche Strecken verschoben, ohne daß der Stoffzusammenhang verlorengeht.

Diese Verschiebung oder das Gleiten erfolgt bevorzugt in solchen Gitterebenen, die am dichtesten mit Atomen besetzt sind. Diese Ebenen nennt man *Gleitebenen*. Die Gleitung erfolgt ferner in Richtung einer kristallographisch einfachen Gittergeraden; dies ist die *Gleitrichtung*. Gleitebene und Gleitrichtung bilden zusammen das *Gleitsystem*.

Im Bild 14 sind am Beispiel der Elementarzelle des kubisch raumzentrierten, des kubisch flächenzentrierten und des hexagonalen Gitters die am dichtesten mit

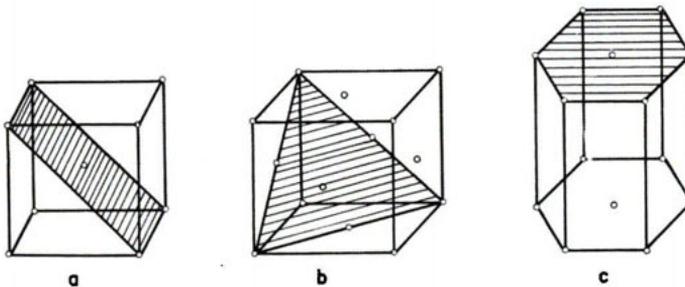


Bild 14 Elementarzellen des kubisch raumzentrierten, des kubisch flächenzentrierten und des hexagonalen Gitters

Atomen besetzten Gitterebenen schraffiert eingezeichnet. Am dichtesten besetzte Gitterebenen in Metallen sind z. B. beim raumzentrierten α -Eisen, Wolfram, Chrom usw. die Flächen des sogenannten Rhomben-Dodekaeders. Bei γ -Eisen, Aluminium, Kupfer und Nickel, die ein kubisch flächenzentriertes Gitter haben, sind es die Flächen des Oktaeders, die am dichtesten mit Atomen besetzt sind, und bei Zink und Magnesium mit hexagonalem Gitter sind es die Basisflächen, in denen die Verschiebung vor sich geht.

Eine solche Formänderung, die unter gegenseitigem Verschieben der Bestandteile eines Kristalls vor sich geht, nennt man *Gleitung* oder *Translation* (Bild 15a).

Eine weitere Möglichkeit der Metalle, bleibende Formänderungen vorzunehmen, besteht in der sogenannten einfachen oder *Zwillings-schiebung*. Hierbei erfolgt ein Umklappen der Kristallteile in eine Zwillingsstellung, d. h. die Symmetrie zu den anliegenden Teilen bleibt jeweils erhalten. Eine Verformung durch Zwillings-schiebung wird häufig bei hexagonalen, zuweilen bei kubisch raumzentrierten und selten bei kubisch flächenzentrierten Metallen angetroffen (Bild 15b und c).

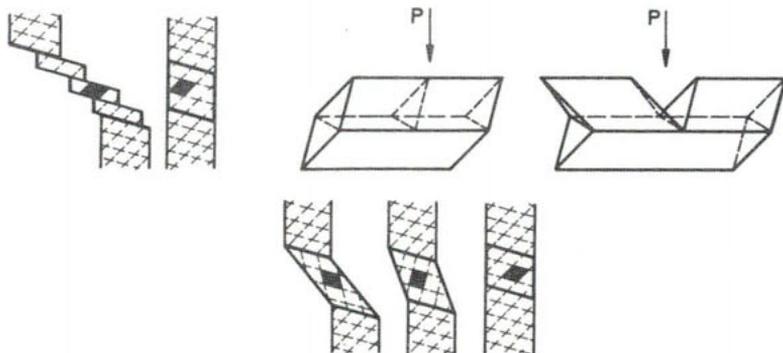


Bild 15a, b, c a) Gleitung b) Zwillings- oder einfache Schiebung c) Zwillingsbildung

Erfahrungsgemäß betätigen sich innerhalb eines unter Krafteinwirkung stehenden Systems nicht alle vorhandenen Gleitebenen gleichmäßig. Dies führt zur Erscheinung der *Gleitlamellen* oder *-pakete*. Die Schichtdicke dieser Gleitlamellen umfaßt den Bereich des mit dem Auge Erkennbaren bis unter den mikroskopischer Auflösbarkeit. Bild 16 zeigt die Ausbildung von Gleitlamellen bei der Translation schematisch.

Die vorstehenden Betrachtungen des Kristallaufbaues und des Verformungsmechanismus bezogen sich auf einen einzelnen Kristall oder sogenannten Einkristall. Die technischen Metalle bestehen jedoch aus einer Vielzahl solcher Einkristalle oder Kristallite, die zwar alle denselben Aufbau aus Elementarzellen mit der zugehörigen Ordnung aufweisen, jedoch gegeneinander im Raum verschieden orientiert sind. Solche Kristallite werden *Körner* genannt. Ihre Begrenzungs-

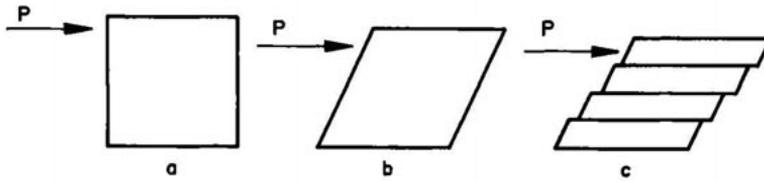


Bild 16 Ausbildung von Gleitlamellen

linien, die meist aus zwischenkristallinen Stoffen bestehen, nennt man *Korn-
grenzen* (Bild 17 zeigt schematisch das Gefüge eines Metalls aus vielen Einzel-
kristallen mit verschiedener Orientierung).

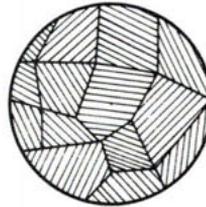


Bild 17 Gefüge eines Vielkristalls

Bild 18 zeigt das Mikrogefüge eines Stahls im Schlifffbild. Man sieht die unter
verschiedenen Winkeln gegeneinander angrenzenden Körner, wie sie Bild 17
schematisch zeigt.

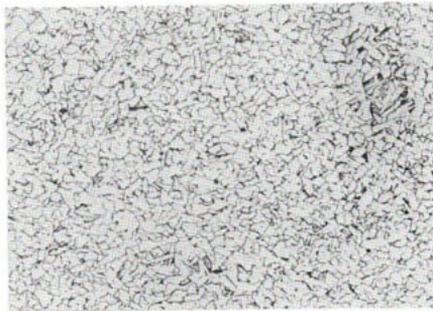


Bild 18 Mikrogefüge eines C-Stahls, unverformt, Vergrößerung 200 : 1

Bild 19 zeigt die Ausbildung von Gleitlinien oder auch Fließfiguren. Entlang
dieser Linien hat unter Einwirkung der deformierenden Kräfte eine Verschie-
bung der Gitterebenen stattgefunden. Es sind also Linien der Gleitung oder
Gleitlinien.

Unter äußerer Krafteinwirkung wird ein vom Einkristall abweichendes Verhalten
der Metalle beobachtet. Durch die wahllos vorliegende Orientierung der Kristal-
lite werden bei Einwirkung deformierender Kräfte immer bestimmte Gleitebenen

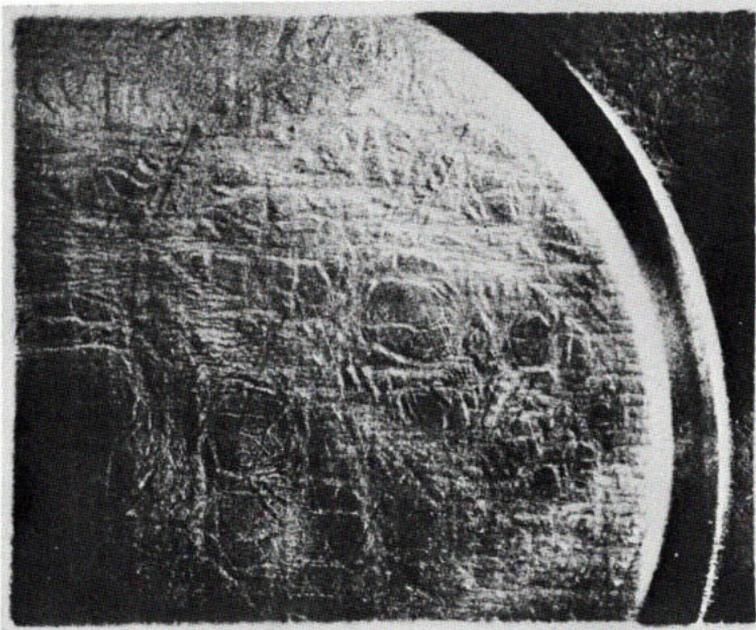


Bild 19 Ausbildung von Fließfiguren

günstig zur Krafrichtung liegen und sich entsprechend betätigen. Bei den ersten Gleitschritten kann deshalb bei den Metallen keine Richtungsabhängigkeit der mechanischen Eigenschaften festgestellt werden. Die Metalle besitzen eine *statistische Isotropie*, oder man sagt, sie verhalten sich *quasi-isotrop*.

Bei wachsender Verformung werden sich in steigendem Maße auch jene Kristallite an den Gleitschritten beteiligen, die zunächst mit ihren Gleitebenen ungünstig zur Krafrichtung liegen. Ferner verändern die Körner dabei ihre Form, und zwar werden sie in Richtung der Hauptformänderung gestreckt. Bild 20 zeigt diese Veränderung schematisch. Mit dieser äußeren Formänderung der Körner

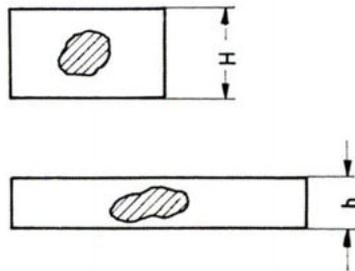


Bild 20 Formänderung eines Kristalls bei plastischer Verformung im Schema

ist gleichzeitig eine Veränderung ihrer gegenseitigen Lage und Orientierung in Hauptverformungsrichtung (z. B. Walzrichtung) verbunden. Damit ergibt sich bei genügend großer Verformung eine gemeinsame Ausrichtung aller Kristallite. Bild 21a und b zeigen die Veränderung der Kornform mit wachsender Kaltverformung. Im Schlibfbild 21b erkennt man eine faserartige Struktur, die als *Textur* bezeichnet wird.

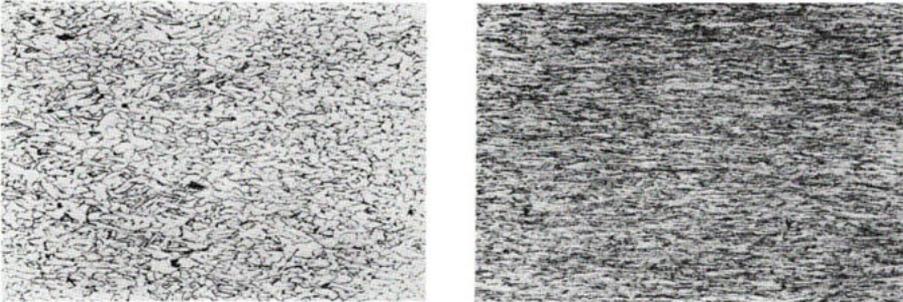


Bild 21 Veränderung der Kornform bei wachsender Kaltverformung
a) Verformung 30 % b) Verformung 80 %

Durch eine solche Strukturänderung des Werkstoffes werden gleichzeitig seine technologischen und physikalischen Eigenschaften stark beeinflusst. Es tritt

erstens eine Richtungsabhängigkeit der mechanischen Eigenschaften auf.

Entnimmt man z. B. einem kaltgewalzten Bandstahl Zerreißproben unter verschiedenen Winkeln zur Walzrichtung, erhält man unterschiedliche Werte für Zugfestigkeit, Streckgrenze, Bruchdehnung usw. Kaltverformte Metalle verhalten sich also anisotrop. Diese Anisotropie ist gegenüber der „natürlichen“ beim Einkristall eine „erzwungene“. Sie wächst mit dem Grad der Kaltverformung.

Zweitens erfahren die Eigenschaften eine grundsätzliche Änderung.

Diese besteht hauptsächlich in einer Abnahme von Bruchdehnung und Zähigkeit unter gleichzeitigem Anstieg von Streckgrenze, Festigkeit und Härte. Elektrische Eigenschaften z. B. werden dahingehend beeinflusst, daß mit zunehmender Kaltverformung eine Abnahme der elektrischen Leitfähigkeit und der magnetischen Durchlässigkeit (Permeabilität) erfolgt. Die Koerzitivkraft (Widerstand gegen Entmagnetisierung) steigt dagegen an. Dies bedeutet eine Verschlechterung der magnetischen Eigenschaften durch die Kaltverformung. Die mechanischen Eigenschaftsänderungen werden unter dem Begriff *Verfestigung* zusammengefaßt. Die Verfestigung wächst dabei mit steigender Kaltverformung.

Die vorliegenden Betrachtungen über die Verformung, Strukturänderung und Verfestigung gelten dann, wenn die vorgenommene Verformung in einem Tem-

peraturbereich abläuft, der nicht gleichzeitig mit einer Rekristallisation, d. h. einer Kornneubildung, verbunden ist. Man ist übereingekommen, diese Rekristallisationstemperatur zur Bestimmung von Warm- und Kaltformgebung zu benutzen. Verlaufen Formänderungsvorgänge unterhalb der Rekristallisationstemperatur, spricht man von *Kalt-*, oberhalb von einer *Warmformgebung*. Die Rekristallisationstemperatur ist für die verschiedenen Stoffe unterschiedlich. Ferner ist sie für den jeweiligen Stoff keine konstante Größe. Einen großen Einfluß übt z. B. die vorausgegangene Kaltformgebung auf die Temperatur aus, bei der eine Rekristallisation einsetzt. In sogenannten Rekristallisationsschaubildern (Bild 22) sind diese Zusammenhänge dargestellt. Dabei erfährt auch die Größe der bei der Rekristallisation entstehenden neuen Körner Beachtung. In einem bestimmten Bereich der Kaltverformung (relativ geringe Verformungsgrade) ist das Gefüge (Körner) gerade so weit verformt oder verändert, daß eine Rekristallisation überhaupt stattfindet. Es entsteht dann ein sehr großes oder grobes Korn. Der Verformungsbereich, der zu dieser Erscheinung führt, wird als *kritische Verformung* bezeichnet. Er kann zwischen 3 und 15 % Kaltverformung liegen.

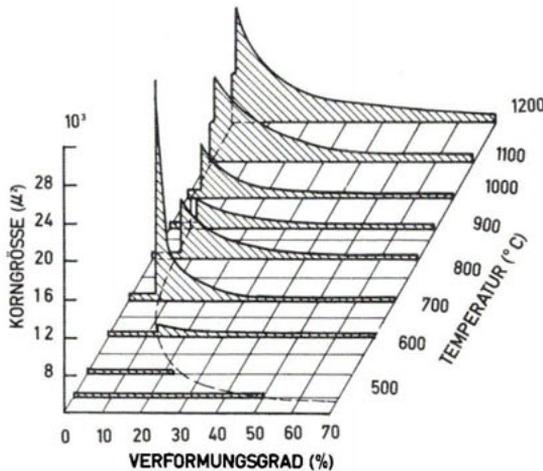


Bild 22 Rekristallisationsschaubild

Die Ursache der Verfestigung versuchten mehrere Theorien in der Vergangenheit zu erklären. Erwähnt sei eine „Blockierung der Gleitebenen“ infolge örtlicher Raumgitterstörungen nach *P. Ludwik*. Andere Forscher sprachen von der Ausbildung einer amorphen Phase auf den Gleitebenen oder aber einer Verbiegung und Aufrauherg der Gleitflächen.

In jüngster Zeit wird eine genauere Analyse der plastischen Verformung und der mit ihr verbundenen Erscheinungen wie z. B. der Verfestigung mit Hilfe der sogenannten Versetzungstheorie geführt. Eine Anzahl von Folgerungen aus dieser Theorie dient ferner heute dem Verständnis der Alterungsvorgänge

(Reckalterung), Die Grundbegriffe und der heutige Stand der Theorie wurden in zahlreichen Veröffentlichungen der letzten Jahre umfassend geschildert und behandelt.

Nachfolgend seien ihre wichtigsten Aussagen vereinfacht zusammengefaßt:

- a) Der Gitteraufbau der Kristalle, also auch der Kristallite oder Körner des Eisens, ist nicht ideal. Ein idealer Aufbau verlangt bei einer plastischen Verformung die gleichzeitige Verschiebung aller in einer Gleitebene liegenden Atome. Die für solche Gleitschritte notwendige Kraft ist aber um das 10^2 - bis 10^3 -fache größer als die in Wirklichkeit zur plastischen Verformung z. B. in einem Zerreißversuch meßbare. Ferner ließe ein solcher Gleitmechanismus z. B. eine Verfestigung nicht zu, und die vorher angeführten Hypothesen müssen versuchen, eine mehr oder weniger klare Notlösung zu finden. Diese Unterschiede zwischen idealen und realen Gleitverhältnissen sucht man durch Annahme von Versetzung mit einem ihnen zugeordneten Mechanismus zu erklären. Unter einer Versetzung wird eine Atomanordnung im Kristallgitter verstanden, wie sie Bild 23b zeigt, während Bild 23a demgegenüber die Atomanordnung in einem idealen Gitterabschnitt darstellt. Diese ideale Gitteran-

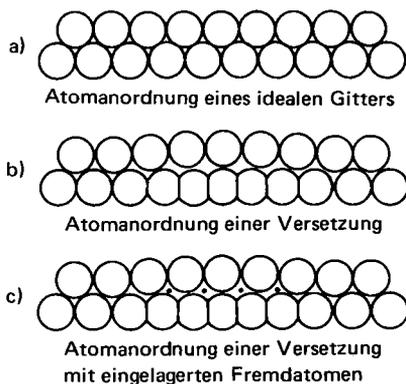


Bild 23a, b, c Atomanordnung idealer und realer Gitter

ordnung ist zugleich ein Zustand größter Stabilität der Lage der Atome. Daraus ergibt sich, daß die Atomanordnung einer Versetzung eine größere potentielle Energie hat. Eine an beide Gitterformen angelegte äußere Schubspannung zur Bewegung der beiden Atomreihen gegeneinander kann also im Fall einer Versetzungsanordnung kleiner sein. Die Translation um einen Gitterschritt längs einer Gitterebene erfolgt zudem so, daß die Versetzung das Gitter durchläuft, indem die einzelnen Teile der Gitterebene nacheinander von der Gleitung erfaßt werden. Dadurch kann gegenüber der plastischen Verformung eines idealen Gitters die notwendige Verformungskraft um einen weiteren Betrag

geringer sein. Bild 24a–c zeigt den Verformungsschritt um einen Atomabstand beim Durchlaufen einer Versetzung durch das Gitter.

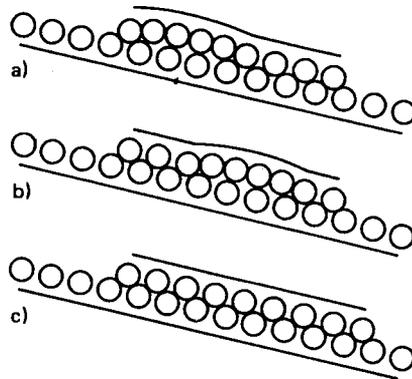


Bild 24a, b, c Atomanordnung nach Knuth-Winterfeld

- b) Eine Translation findet durch Bewegung von Versetzungslinien – das sind kettenförmige Aneinanderreihungen von Versetzungen – auf Gleitebenen in bestimmten kristallographischen Richtungen statt. Energetische Betrachtungen führten zu der Annahme, daß die Versetzungslinien, wie sie den Kristalliten durchqueren, nicht sofort in ihrer ganzen Länge entstehen. Die einzelnen Versetzungselemente der Linie beginnen nacheinander die Wanderung aufzunehmen.
- c) Durch den Verformungsvorgang selbst werden neue Versetzungen erzeugt. Die Wanderung von Versetzungen wird an Gitterstörungen im Kristall aufgehalten; die Versetzung bleibt hier liegen. Beide Tatsachen bewirken eine Zunahme der Versetzungsdichte im Verformungsvorgang. Die Zunahme der Versetzungsdichte in Verbindung mit einer bestimmten Anordnung der Versetzungen bewirkt die Verfestigung. Verfestigung bedeutet Gleiterschwerung, d. h. bei gleichbleibender Spannung Stillstand des Gleitens oder Weitergleitens bei höheren Spannungen.
- d) Eine Versetzung ist mit einem Spannungsfeld verbunden, welches das Raumgitter örtlich verzerrt. Auf der einen Seite der Versetzung ist das Gitter gereckt, auf der anderen zusammengezogen. Die Spannungsfelder benachbarter Versetzungen, die auf parallelen Gleitebenen liegen, beeinflussen sich derart, daß Versetzungen gleichen Vorzeichens abgestoßen, solche ungleichen Vorzeichens angezogen werden. Zum Beispiel wird eine nach rechts wandernde Versetzung das Bestreben haben, eine in Wanderrichtung auf derselben oder auf einer benachbarten parallelen Gleitebene liegende Versetzung glei-

chen Vorzeichens vor sich herzutreiben. Um die Bewegung von Versetzungen einzuleiten, d. h. ein Gleiten herbeizuführen, ist eine bestimmte Spannung notwendig; dies ist die Spannung beim Erreichen der Streckgrenze.

- e) Versetzungen stehen in folgender Wechselwirkung mit den im technischen Eisen gelösten Fremdatomen Kohlenstoff und Stickstoff. Die Versetzung mit dem ihr zugeordneten Spannungsfeld (s. Abschnitt a) stellt einen Zustand erhöhter Gitterenergie dar. Im Bestreben, das System in den Zustand kleinster freier Energie zu setzen, wie dies in der Natur jedes in sich geschlossene System anstrebt (Le Chatelier), wandern gelöste Kohlenstoff-(Stickstoff-) Atome zum Bereich der Versetzung hin. Durch diesen Vorgang können dort die Spannungen herabgesetzt werden. Versetzung und hinzugewanderte Fremdatome bilden ein neues Energiegleichgewicht. Man spricht von einer Wolke, mit der sich die Versetzung umgeben hat. Mit der Bildung einer solchen Wolke um die Versetzung wird deren Beweglichkeit vermindert. Die Versetzung ist blockiert (Bild 23c). Bei einer erzwungenen Bewegung einer solchen Versetzung wird diese bestrebt sein, die Wolke mitzuschleppen; umgekehrt versucht die Wolke, die Versetzung an der Wanderung zu hindern. Das Mitwandern der Wolke ist nur möglich, wenn die Geschwindigkeit der Versetzung klein oder gleich ist gegenüber der Geschwindigkeit der Wolke, die ihr durch die Bindungskräfte an die Versetzung erteilt werden kann. Ist die Geschwindigkeit größer (bei den allgemeinen Verformungsgeschwindigkeiten ist dies der Fall), wird die Versetzung von der Wolke losgerissen. Um blockierte Versetzungen zu bewegen, bedarf es demnach größerer Spannungen, als sie zur Bewegung unblockierter Versetzungen erforderlich sind. Die Vorstellung führt zu einer Erklärung der ausgeprägten Streckgrenze.

2.3. Kräfte oder Spannungen bei plastischer Formänderung

Bei der Frage nach den Kräften oder Spannungen, die eine plastische Formänderung bewirken, hat sich für die Betrachtung der technischen Formgebungsverfahren die *Schubspannungshypothese* als zweckmäßig erwiesen. Es wird davon ausgegangen, daß sich die metallischen Werkstoffe aus einem Haufwerk kleiner Einzelkristallite aufbauen, die im allgemeinen völlig ungeordnet nebeneinanderliegen. Da in den meisten Fällen innerhalb dieser einzelnen Kristallite eine Gleitung in verschiedene Richtungen erfolgen kann, ergibt es sich, daß für die Verformung keine bevorzugte Richtung besteht. Die Metalle verhalten sich *quasi-isotrop*. Die Gesamtformänderung wird also nur durch das äußere Spannungsfeld bestimmt und ist unabhängig von der Lage der einzelnen Gleitebenen.

Unter einer beliebigen Beanspruchung können die wirksamen Kräfte im Sinne der drei Raumkoordinaten stets auf drei senkrecht zueinanderstehende Kräfte zurückgeführt werden. Jede dieser drei Kräfte erzeugt in der zu ihrer Richtung

senkrecht gelegenen Ebene eine Spannung (Bild 25). Die in den drei Ebenen so entstehenden Spannungen werden *Hauptspannungen* genannt. Es wird die

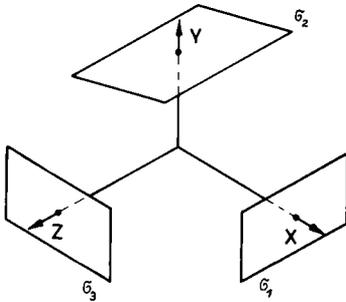


Bild 25 Kräfterichtungen und Hauptspannungsebenen

Annahme getroffen, daß zwischen den drei Hauptspannungen, die mit σ_1 , σ_2 und σ_3 bezeichnet sein sollen, das Verhältnis besteht:

$$\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3 \text{ (kp/mm}^2\text{)}$$

Der plastische Zustand tritt nach der Schubspannungshypothese dann ein, wenn die halbe Differenz der größten und kleinsten Hauptspannung gleich der größten Schubspannung ist. Es ist:

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = \tau_{\max.} \quad (3)$$

und

$$\sigma_1 - \sigma_3 = 2 \tau_{\max.} = k_f \quad (4)$$

k_f (kp/mm²) = Formänderungsfestigkeit (dies ist der zur Verformung notwendige Spannungsunterschied)

$\tau_{\max.}$ (kp/mm²) = größte Schubspannung

Nach der Schubspannungshypothese ist also die mittlere Hauptspannung σ_2 ohne Einfluß auf k_f und damit auf die Einleitung einer plastischen Formänderung.

In einem einachsigen Zug- oder Druckversuch, d. h. es wirken nur Kräfte und damit Spannungen in einer Richtung, wird dann:

$$\sigma_1 = 2 \tau_{\max.} = k_f \quad (5)$$

In einer solchen Weise kann dann in einfacher Form die Größe von k_f ermittelt werden, um für alle möglichen Beanspruchungen zu gelten.

Neben der angeführten Schubspannungshypothese bestehen noch einige andere Hypothesen, die namentlich erwähnt seien.

In der *Gestaltungsänderungshypothese* wird der Einfluß der mittleren Hauptspannung σ_2 mit einbezogen; es gilt folgende Beziehung:

$$k_f = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}} \quad (6)$$

Nach der *Höchstspannungstheorie* tritt eine plastische Formänderung nach Überschreiten einer bestimmten Höchstspannung ein.

Für die spanlose bildsame Formgebung gilt in Annäherung das *Gesetz der Volumenskonstanz*. Wird z. B. ein Körper mit der Fläche F und der Höhe h so gestaucht, daß er nach der Stauchung die Fläche F_1 und die Höhe h_1 besitzt, so gilt:

$$F_0 \cdot h_0 = F_1 \cdot h_1 = V \quad (7)$$

V (mm³) = Volumen des Körpers
 F_0, F_1 (mm²) = Fläche vor bzw. nach der Verformung
 h_0, h_1 (mm) = Höhe vor bzw. nach der Verformung

Trifft man die Annahme, daß eine Stauchung (z. B. unter der Presse) ohne jegliche Reibung zwischen Stauchgut und Preßwerkzeug vor sich geht, wird auch hier die Formänderung durch einen einachsigen Spannungszustand bewirkt (wirksame Kräfte nur in Druckrichtung). Nach Gleichung (5) ist dann $\sigma_1 = k_f$. Die notwendige Stauchkraft errechnet sich wie folgt:

$$P = k_f \cdot F_d \quad (8)$$

P (kp) = Stauchkraft
 F_d (mm²) = zu drückende Fläche

Betrachtet man eine solche Stauchung um einen sehr kleinen Höhenunterschied dh , so benötigt man dazu den sehr kleinen Arbeitsbetrag dA :

$$dA = P \cdot dh = F_d \cdot k_f \cdot dh \quad (9)$$

(Arbeit) (Kraft · Weg) (Kraft) (Weg)

Durch Umformen von Gleichung (7) erhält man:

$$F = \frac{V}{h} \quad (10)$$

somit ergibt sich:

$$dA = k_f \cdot V \frac{dh}{h} \quad (11)$$

Die Arbeit über den Höhenunterschied ($h_0 - h_1$) errechnet sich nach Integration und unter Beachtung von idealen Bedingungen (keine Reibung und konstantes k_f) durch folgende Gleichung:

$$A_0 = k_f \cdot V \cdot \ln \frac{h_0}{h_1} \cdot 10^{-3} \quad (12)$$

A_0 (kpm) = Verformungsarbeit unter idealen Bedingungen

In Wirklichkeit liegen solche Verhältnisse nicht vor. Wenn der Werkstoff der verformenden Druckkraft in Querrichtung auszuweichen versucht, wird das freie, gleichmäßige Fließen des Werkstoffes durch Reibungskräfte zwischen Stauchwerkzeug und Stauchkörper behindert und dadurch ein mehrachsiger Spannungszustand hervorgerufen. Die Oberflächenreibung erzeugt einen *Fließwiderstand*. Durch den Materialzusammenhang entstehen gleichzeitig im Innern des Werkstoffes, d. h. in Schichten, die nicht unmittelbar mit den Preßflächen in Berührung stehen, ungleichmäßige Spannungsverteilungen, verbunden mit einem ungleichmäßigen Fließen der Materialteilchen. Es bilden sich Zonen mehr oder weniger behinderter Verformung aus. Die wirkliche Verformungsarbeit muß also die durch die Oberflächenreibung entstehenden äußeren und inneren Formgebungsverluste durch zusätzlichen Arbeitsaufwand decken.

In Gleichung (12) tritt an die Stelle von k_f der *Formänderungswiderstand* k_w , der diese Verluste berücksichtigen soll; es ist:

$$k_w = k_f + k_r + k_i \quad (13)$$

k_w (kp/mm²) = Formänderungswiderstand
 k_r (kp/mm²) = äußere Reibungsverluste an den Arbeitsflächen
 k_i (kp/mm²) = innere Reibungsverluste

Somit ergibt sich:

$$A_{\text{wirk}} = k_w \cdot V \cdot \ln \frac{h_0}{h_1} \cdot 10^{-3} \quad (14)$$

A_{wirk} (kpm) = tatsächlich erforderliche Arbeit

Ein anschauliches Bild von der Wirkung der Oberflächenreibung vermittelt z. B. die Aufbauchung zylindrischer Proben im Stauchvorgang. Die entstehende Tonnenform kann durch Wahl entsprechender Schmiermittel (größere oder geringere Reibung) mehr oder weniger ausgeprägt werden. Bild 26 zeigt Ausbildungsfor-

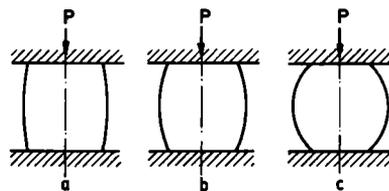


Bild 26 Wirkung der Preßflächenreibung im Stauchvorgang auf die Probenform
 a) geringe Reibung b) stärkere Reibung c) sehr starke Reibung

men eines Stauchgutes unter der Presse bei unterschiedlichen Reibungsverhältnissen. Wenn man die verlustlose Arbeit für eine bestimmte Verformung ins Verhältnis setzt zu der wirklich benötigten Arbeit, die die aufgezeigten Verluste

berücksichtigt, erhält man den *Formänderungswirkungsgrad* η_{form} eines Formgebungsverfahrens. Es ist:

$$\frac{A_0}{A_{wirk}} \cdot 100 (\%) = \eta_{form} \quad (15)$$

Da sich, wie oben gezeigt, A_0 und A_{wirk} ausschließlich durch k_f bzw. k_w unterscheiden, gilt:

$$\frac{k_f}{k_w} = \eta_{form} \quad (16)$$

oder

$$k_w = \frac{k_f}{\eta_{form}} \quad (16a)$$

Wenn also der Formänderungswirkungsgrad eines Verfahrens bekannt ist, kann k_w , wenn auch nicht sicher berechnet, so doch in genügend genauen Grenzen abgeschätzt werden.

Im Fall des Zerreißversuchs wird dann $\eta_{form} = 1$.

3. Grundlagen des Walzens

3.1. Grundbegriffe

Bei der Verformung eines Walzgutes durch ein Walzenpaar beginnt die Querschnittsverminderung beim Eintritt in den Walzspalt.

Unter *Walzspalt* versteht man den Raum zwischen den Walzen, der durch die Verbindungslinien $E - A - A_1 - E_1$ und die jeweilige Walzgutbreite (b_0 bzw. b_1) begrenzt wird. Die Ebene, die durch die beiden Achsen der Walzen M und M_1 gelegt werden kann, wird als *Walzebene* bezeichnet (Bild 27).

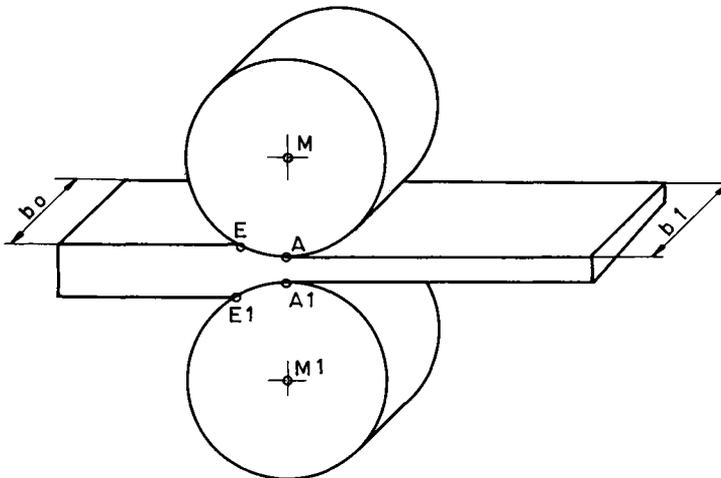


Bild 27 Walzspalt, Walzebene

Unter *Walzdruck* versteht man die Kraft, die beim Walzvorgang in der Walzebene senkrecht zur Walzenachse erzeugt wird. Die Größe der Walzkraft P ist abhängig von der Berührungsfläche zwischen Walzen und Walzgut und vom Formänderungswiderstand k_w . Die Berührungsfläche zwischen Walze und Walzgut wird *gedrückte Fläche* F_d genannt. Der Berührungsbogen heißt *gedrückte Länge* l_d (Bild 28).

Der Abstand der Walzenoberflächen in der Walzebene wird *Walzenöffnung* genannt. Die Größe der Walzenöffnung kann durch eine sogenannte *Anstellung* (siehe Kapitel 5.5.) eingestellt werden.

Ein- und Austritt des Walzgutes erfolgen senkrecht zur Walzebene. Diese Richtung wird als *Walzrichtung* bezeichnet.