

Siegfried Kluge

# Prozesse der Blechumformung

Bauteil-, Werkzeug- und  
Fertigungsgestaltung im Karosseriebau



HANSER

Kluge

## Prozesse der Blechumformung



### **Bleiben Sie auf dem Laufenden!**

Hanser Newsletter informieren Sie regelmäßig über neue Bücher und Termine aus den verschiedenen Bereichen der Technik. Profitieren Sie auch von Gewinnspielen und exklusiven Leseproben. Gleich anmelden unter

**[www.hanser-fachbuch.de/newsletter](http://www.hanser-fachbuch.de/newsletter)**



Siegfried Kluge

# Prozesse der Blechumformung

Bauteil-, Werkzeug- und Fertigungsgestaltung  
im Karosseriebau

Mit 458 Abbildungen, sowie zahlreichen Tabellen und Formeln

HANSER

Der Autor:  
*Prof. Dr.-Ing. habil. Prof. e.h. Siegfried Kluge,*  
Langenweißbach, siegfried.kluge@fh-zwickau.de

Alle in diesem Buch enthaltenen Informationen wurden nach bestem Wissen zusammengestellt und mit Sorgfalt geprüft und getestet. Dennoch sind Fehler nicht ganz auszuschließen. Aus diesem Grund sind die im vorliegenden Buch enthaltenen Informationen mit keiner Verpflichtung oder Garantie irgendeiner Art verbunden. Autor und Verlag übernehmen infolgedessen keine Verantwortung und werden keine daraus folgende oder sonstige Haftung übernehmen, die auf irgendeine Art aus der Benutzung dieser Informationen – oder Teilen davon – entsteht.

Ebenso wenig übernehmen Autor und Verlag die Gewähr dafür, dass beschriebene Verfahren usw. frei von Schutzrechten Dritter sind. 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.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:

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

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdruckes und der Vervielfältigung des Buches, oder Teilen daraus, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder ein anderes Verfahren) – auch nicht für Zwecke der Unterrichtsgestaltung – reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

© 2020 Carl Hanser Verlag München  
[www.hanser-fachbuch.de](http://www.hanser-fachbuch.de)  
Lektorat: Dipl.-Ing. Volker Herzberg  
Herstellung: Björn Gallinge  
Coverkonzept: Marc Müller-Bremer, [www.rebranding.de](http://www.rebranding.de), München  
Titelmotiv: © [istockphoto.com/Wlad74](https://www.istockphoto.com/Wlad74)  
Coverrealisation: Max Kostopoulos  
Satz: Kösel Media GmbH, Krugzell  
Druck und Bindung: UAB BALTO print, Vilnius (Litauen)  
Printed in Lithuania

Print-ISBN: 978-3-446-45576-4  
E-Book-ISBN: 978-3-446-46071-3

# Inhalt

<b>Vorwort</b> .....	<b>XI</b>
<b>1 Einführung</b> .....	<b>1</b>
1.1 Der Fertigungsprozess von Karosseriebauteilen .....	1
1.2 Abriss zur historischen Entwicklung der Blechbranche im Automobilbau .....	4
1.3 Ausbildung qualifizierter Fachkräfte .....	13
Literatur .....	18
<b>2 Umformtechnische Grundlagen</b> .....	<b>21</b>
2.1 Umformmechanismus .....	21
2.2 Umformfestigkeit und Fließkurve .....	25
2.3 Mehrachsigkeit der Beanspruchung, Fließbedingungen, Fließgesetz .....	31
2.4 Anisotropie der Blechwerkstoffe .....	35
2.5 Umformvermögen, Umformgrenze, Grenzformänderung .....	38
2.6 Reibung und Verschleiß .....	48
Literatur .....	63
<b>3 Blechwerkstoffe</b> .....	<b>65</b>
3.1 Leichtbau Karosserie .....	65
3.2 Stahlwerkstoffe .....	70
3.2.1 Verfestigungsmechanismen .....	70
3.2.2 Fertigung von Stahlblechen .....	73
3.2.3 Klassifizierung und Bezeichnung .....	74
3.2.4 Weiche Stähle .....	78
3.2.5 Höherfeste Stahlwerkstoffe .....	80

3.2.6	Mehrphasenstähle .....	82
3.2.7	Fließkurven und Grenzformänderungskurven im Vergleich .....	87
3.3	Leichtmetalle .....	89
3.3.1	Einsatzperspektiven .....	89
3.3.2	Aluminiumlegierungen im Karosseriebau .....	91
3.3.3	Magnesiumlegierungen .....	93
3.3.4	Titan, Titanlegierungen .....	96
3.4	Einsatz von Tailored Blanks .....	97
	Literatur .....	100
<b>4</b>	<b>Beanspruchungsidentifikation .....</b>	<b>103</b>
4.1	Problemstellung – Übersicht .....	103
4.2	Biegebeanspruchungen an Karosseriebauteilen .....	108
4.2.1	Verfahrensvarianten .....	108
4.2.2	Das freie Biegen .....	110
4.2.3	Biegen im Gesenk .....	117
4.2.4	Das Biegen von Hutprofilen .....	120
4.2.5	Ziehstäbe und Bremswülste .....	125
4.2.6	Biegen wenig gekrümmter Blechteile .....	134
4.3	Die Tiefziehbeanspruchung .....	137
4.3.1	Verfahrensvarianten .....	137
4.3.2	Grundlagen .....	140
4.3.3	Tiefziehen im Weiterschlag .....	145
4.3.4	Das Tiefziehen unrunder Bauteilkonturen .....	147
4.3.5	Die Niederhalterkraft für das Tiefziehen komplexer Bauteile .....	150
4.3.6	Tiefziehen mit großem Ziehspalt .....	156
4.3.7	Das Arbeitsdiagramm zum Nivellieren der Niederhalterkraft .....	157
4.3.8	Ermittlung der Zuschnittskonturen .....	165
4.4	Fertigungsverfahren der Zugumformung .....	168
4.4.1	Definitionen, Verfahrensanwendungen .....	168
4.4.2	Das Hohlprägen .....	170
4.4.3	Streckziehen mit Umformwerkzeugen .....	174
4.4.4	Rückfederung beim Streckziehen wenig gewölbter Karosserieteile .....	181
4.5	Kragenziehen – Weiten von Fließöffnungen, Fließöffnungen und Formkonturen .....	184
4.5.1	Verfahrensvarianten .....	184

4.5.2	Grundlagen des Aufweitens und Kragenziehens . . . . .	186
4.5.3	Fließöffnungen, Fließschnitte, Entlastungsschnitte . . . .	190
4.6	Das Nachformen von Radien . . . . .	197
4.6.1	Verfahren – Verfahrensanwendungen . . . . .	197
4.6.2	Verfahrensgrundlagen . . . . .	198
4.7	Das Falzen von Karosseriebauteilen . . . . .	202
4.7.1	Verfahrenserläuterung . . . . .	202
4.7.2	Verfahrensgrenzen . . . . .	205
4.8	Das Schneiden von Blechen mit Werkzeugen . . . . .	207
4.8.1	Verfahrensübersicht . . . . .	207
4.8.2	Analyse des Schneidvorgangs . . . . .	209
4.8.3	Kenngößen der Schnittfläche . . . . .	210
4.8.4	Ermittlung energetischer Kenngößen . . . . .	211
4.8.5	Schnittqualität . . . . .	214
4.9	Presshärten . . . . .	216
4.9.1	Das Verfahren . . . . .	216
4.9.2	Blechwerkstoffe und ihr Verhalten . . . . .	218
4.9.3	Anlagen und Werkzeuge . . . . .	219
	Literatur . . . . .	222
<b>5</b>	<b>Finite-Elemente-Simulation in der Blechbearbeitung . . . . .</b>	<b>225</b>
5.1	Das Entwicklungskonzept . . . . .	225
5.2	Die Grundlagen . . . . .	226
5.3	Anwendungen . . . . .	230
5.4	Stand und Weiterentwicklung . . . . .	234
	Literatur . . . . .	235
<b>6</b>	<b>Qualitätsmanagement im Produktentstehungsprozess . . . . .</b>	<b>237</b>
6.1	Anforderungen des Marktes . . . . .	237
6.2	Qualitätsstrategie für die Prozesskette Karosserie . . . . .	239
6.3	Qualitätsanforderungen an Karosseriebauteile . . . . .	241
6.4	Qualitätsmängel – Qualitätsrisiken . . . . .	243
6.5	Toleranzmanagement . . . . .	251
6.6	Prüfmethoden . . . . .	254
6.7	Parallelentwicklungen – Basis der Produktentstehung . . . . .	258
6.8	Prozessrobustheit . . . . .	263
	Literatur . . . . .	269

<b>7</b>	<b>Maschinentechnik für das Umformen und Schneiden</b>	<b>271</b>
7.1	Wandel der Anforderungen	271
7.2	Einteilung und Übersicht	274
7.3	Einzelpressen und Pressensysteme	283
7.4	Betrachtungen zur Wirtschaftlichkeit	293
	Literatur	296
<b>8</b>	<b>Fertigungsplanung</b>	<b>299</b>
8.1	Inhalte und Zielstellung	299
8.2	Produktzuordnung – Logistik	300
8.3	Die Grundtechnologie – dominierende Verfahrenskombination	304
8.4	Arbeitsweisen	306
8.5	Erste Durchlaufplanung	312
8.6	Wirtschaftliche Vergleiche von Fertigungsvarianten	317
	Literatur	320
<b>9</b>	<b>Entwicklung und Bau der Werkzeuge</b>	<b>321</b>
9.1	Konzeptionelle Grundlagen	321
9.2	Die Entwicklung der Prozessfolge großer komplexer Blechwerkstücke – der Methodenplan	324
9.2.1	Einführende Betrachtungen – Probleme der Prozessgestaltung	324
9.2.2	Anforderungen an die Methodenplanung	329
9.2.3	Die fertigungsgerechte Konstruktion von Karosserieteilen	338
9.2.4	Die Ziehanlagengestaltung	346
9.2.4.1	Vergegenständlichte Vorstellungen	346
9.2.4.2	Die Fertigungsrichtungen	349
9.2.4.3	Niederhalterfläche, Ankonstruktion und Stempelumriss	356
9.2.4.4	Praxisbeispiele zum Vertiefen der Ziehanlagenentwicklung	362
9.2.5	Die Ziehanlagenoptimierung	384
9.2.5.1	Notwendigkeit und Ziele	384
9.2.5.2	Beispiele der Ziehanlagenoptimierung	387
9.2.6	Spezielle Anforderungen an die Arbeitsfolgegestaltung	404
9.2.6.1	Übersicht, Problemstellung	404
9.2.6.2	Schneid- und Nachformoperationen	406

9.2.6.3	Durchlaufuntersuchungen .....	417
9.2.6.4	Abfallabführung .....	418
9.2.6.5	Überprüfen des Kraft- und Arbeitsbedarfs ...	421
9.2.6.6	Werkzeugprinzipien und Methodenplan .....	428
9.2.6.7	Rückfederung und Rückfederungs- kompensation .....	431
9.3	Werkzeuge der Karosserieteilefertigung .....	438
9.3.1	Übersicht .....	438
9.3.2	Stückgut- und Folgefertigung .....	439
9.3.3	Ziehwerkzeuge .....	444
9.3.4	Beschneide- und Nachformwerkzeuge .....	447
9.3.5	Werkzeugwerkstoffe .....	452
9.3.6	Werkzeuge für die Prototypen- und Kleinserienfertigung .....	461
9.4	Ausgewählte Bereiche der Werkzeugfertigung .....	469
9.4.1	Werkzeugkonstruktion .....	469
9.4.2	Anfertigung der Gießmodelle .....	472
9.4.3	Bearbeitung der Werkzeuge .....	472
9.4.4	Montage der Werkzeuge .....	473
9.4.5	Der Werkzeug-Tryout .....	474
	Literatur .....	477
	<b>Index .....</b>	<b>479</b>



# Vorwort

Die Automobilindustrie gehört mit ihren Zulieferern zu den führenden und leistungsfähigsten Wirtschaftsbranchen und Arbeitgebern in Deutschland. Mit ihren hohen Ansprüchen an Mobilität, Komfort, Qualität und Umweltverträglichkeit wachsen die Anforderungen an die Entwicklung der Fertigung und Fertigungsausrüstungen, um dem hohen Leistungsdruck des Weltmarktes entsprechen zu können.

Moderner Automobilbau ist gekennzeichnet durch neue Antriebstechniken, Nutzungsmodifikationen, Derivatangebote und Ausrüstungsvarianten. Er fordert das Verkürzen der Modellwechselzeiten, das Entwickeln und Anwenden verbesserter Leichtbauwerkstoffe und einen kontinuierlichen Anstieg der Qualität der Erzeugnisse. Damit werden neue, qualifiziertere Formen der Zusammenarbeit aller an einem Entwicklungsprojekt beteiligten Bereiche erforderlich.

Größte Wertschöpfung erreicht die Automobilbranche mit ihrem hochinvestiven Werkzeugbau, der als Bindeglied zwischen Produktentwicklung und industrieller Produktion eine Schlüsselstellung einnimmt und mit seinen Erzeugnissen von hohem Niveau einer uneingeschränkten Förderung und Weiterentwicklung bedarf.

Dem Bau der Umform- und Schneidwerkzeuge geht eine umfassende, in Qualitätsabschnitte gegliederte Prozessplanung mit ansteigendem Leistungsergebnis voraus.

In der Bauteilentwicklung und Prozessplanung der komplexen Blechgebilde waren gegen Ende des vergangenen Jahrhunderts die Empirie vorherrschend. Mit dem Trend elektronischer Datenverarbeitung der letzten 30 Jahre, wurde für die Gestaltung und Berechnung von Freiformen ein bahnbrechender Fortschritt erzielt. Aus ursprünglich empirischen Lösungen entstehen zunehmend wissenschaftlich begründete Ergebnis-Sequenzen. CAD- und FEM- Programme sind nunmehr die Werkzeuge der Bauteilkonstruktion und Prozessplanung. Das Fernziel eines elektronischen Datentransfers, von der Werkstoffentwicklung bis hin zu Fahrzeugcrash ist der hohe Anspruch weiterer Forschungstätigkeit.

Der Fertigungsprozess eines Karosseriebauteils, als Stufenfolge von Umform- und Schneidvorgängen, ist zunächst eine mittels Computer gestaltete Modell-Lösung. Die CAD-Daten des Bauteils sind die Basis für den in Qualitätsstufen entwickelten Fertigungsplan mit Modellcharakter und Grundlage für die Konstruktion der Umform- und Schneidwerkzeuge.

Zielstellung ist es, dass die Wirkflächen der generierten Werkzeugmodelle Qualitätsergebnisse virtueller Werkstückmodelle ermöglichen, die mit den analogen Erprobungsergebnissen der in Stahl und Eisen vergegenständlichten Werkzeuge weitgehend übereinstimmen.

Dafür sind Arbeits- und Qualifizierungsbedingungen zu ermöglichen, die den eingangs geschilderten, steigenden Anforderungen in der Automobilbranche gerecht werden. Für eine effiziente Prozessgestaltung setzt das die Einsichten voraus:

- Theorie und Methodenkompetenz sind die dominierenden Arbeitsgrundlagen für das Erkennen, Verändern und Optimieren der Werkstückbeanspruchung beim Umformen und bei der Arbeitsstufengestaltung
- Kriterien fertigungsgerechter Gestaltung sind bereits beim Entwurf des Bauteils zu berücksichtigen, um Fertigungsrisiken auszuschließen
- Eine enge Zusammenarbeit von Bauteil- und Prozessentwickler ist Bedingung einer robusten Fertigung mit hoher Effizienz

Dieses Buch soll zum besseren Verständnis des Gesamtprozesses von Konstruktion und Fertigung unregelmäßig geformter, komplexer Blechbauteile, insbesondere von Karosseriebauteilen, beitragen.

Das Buch enthält Arbeitsergebnisse der KUKA-Werkzeugbau Schwarzenberg GmbH, jetzt Porsche Werkzeugbau GmbH und der Westsächsischen Hochschule Zwickau. Mein Dank gilt Mitarbeitern dieses Werkzeugbau-Traditionsunternehmens in Schwarzenberg, in dem ich nach meinem Ingenieurstudium die Tätigkeit als Werkzeugkonstrukteur begann und in Jahrzehnte folgender wissenschaftlicher Zusammenarbeit Erfahrungen und Fachwissen ergänzen konnte.

Besonderer Dank gilt den Mitarbeitern des Labors Fertigungstechnik der Westsächsischen Hochschule Zwickau für ihre Unterstützung und den Mitarbeitern des Carl Hanser Verlag München für ihren umfassenden Beitrag bei der Gestaltung dieses Buches.

Siegfried Kluge, Langenweißbach, Oktober 2019

## ■ 1.1 Der Fertigungsprozess von Karosseriebauteilen

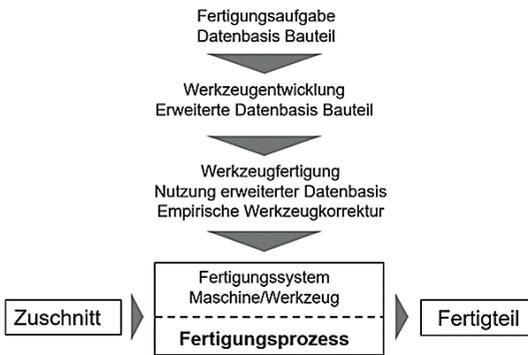
Fertigungsprozesse finden mit Hilfe von Fertigungssystemen statt. Sie enthalten Fertigungsmittel, die zur Durchführung des Fertigungsprozesses erforderlich sind. Dazu gehören die Fertigungsmaschinen, die Werkzeuge, Spannzeuge, Messzeuge und sonstige Hilfsmittel /1.01/.

Von besonderer Bedeutung für die Fertigung von Karosseriebauteilen sind die Umform- und Schneidwerkzeuge. Sie sind Träger des Forminhalts eines in Stufenfolge entstehenden Fertigteils, welche die Qualität des Fertigungsergebnisses dominierend bestimmen. Als Fertigungsmittel führen sie Relativbewegungen gegenüber dem entstehenden Werkstück mit dem Ziel aus, in Fertigungsstufen eine bleibende Änderung der Form mittels Energie-, Material- und Informationseinflüssen schrittweise zu erreichen /1.01/.

Dem Wirkpaar Werkzeug/Werkstück wird die Fertigungsaufgabe in Form von Programmen übermittelt, die geometrische und verfahrensspezifische Informationen enthalten. Bild 1.1 beinhaltet die Verknüpfung von Programmierdaten und den Fertigungsablauf im Fertigungsprozess von Karosseriebauteilen. Die bei der Bauteilentwicklung erzeugte Geometrie-Datenbasis wird zunächst für die Fertigungsentwicklung in Form geometrischer, werkstofftechnischer und werkzeugtechnischer Inhalte erweitert, um die Anforderungen an die Funktion und Qualität des Bauteils im Fertigungsprozess abzusichern. Die neue geometrische Datenbasis, die im weiteren Verlauf des Planungsprozesses zu optimieren ist, wird Grundlage für die endgültige Prozess- und Werkzeugfertigung. Je nach Komplexität des Bauteils ist eine empirisch-manuelle Korrektur der Werkzeuge im Tryout-Prozess zu berücksichtigen. Die Komplexität der Bauteile wird durch folgende Eigenschaften bestimmt:

- die Vielfalt der im Bauteil enthaltenen, unter kritischen Formänderungsbedingungen umzuformenden Formelemente

- die Anzahl der Designkanten bei Außenteilen oder der Funktionselemente bei Innenteilen
- die Qualitäts- und Funktionsanforderungen des Bauteils
- der Neuheitsgrad der Formgestaltung

**Bild 1.1**

Verknüpfung von Programmierdaten und Fertigungsablauf im Fertigungsprozess der Karosserieteile-Fertigung

#### Karosserie- Außenhaut- Bauteile

Hohe Qualitätsansprüche an Oberflächengüte und Maßgenauigkeit

Werkstoffbeispiele: DC06, DX56, DC07, DX57

Al- Mg- Si- Legierungen

R<sub>p</sub> = 120 bis 250 MPa



#### Karosserie- Innen- Bauteile

Hohe Ansprüche an Strukturfestigkeit und Maßgenauigkeit mit Tragwerk-, Bauraum-, Befestigungs- und Verstärkungsfunktion

Werkstoffbeispiele: H260Y, H500X, Trip 700, CP-W800, MS-W1200

Al- Mg- Legierungen, Mg- Legierungen

R<sub>p</sub> = 300 bis 1000 MPa



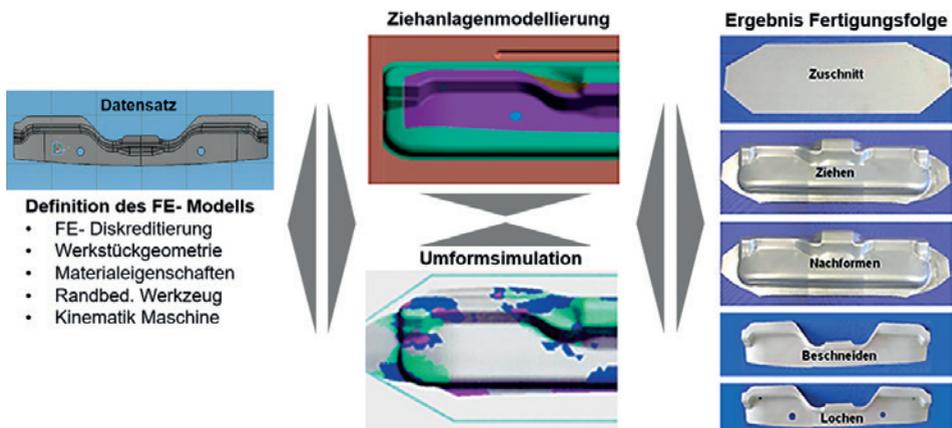
**Bild 1.2** Werkstücksortiment, bestehend aus Karosserieaußenhaut- und Karosserieinnen-Bauteilen

Die auf der Produktionsmaschine eingearbeiteten Umform- und Schneidwerkzeuge bilden die Basis für den Fertigungsprozess des Karosseriebauteils ausgehend vom Zuschnitt bis hin zum Fertigteil. Das Bauteil und die Auslegung der Werkzeuge

sind über gemeinsame Geometrie-, Werkstoff- und Technologieinhalte verknüpft, die vom Beginn der Fahrzeugentwicklung an, die Zusammenarbeit zwischen Bauteil- und Fertigungsentwickler fordern, um ein optimales Fertigungsergebnis hinsichtlich Funktionalität, Qualität und Wirtschaftlichkeit zu erreichen.

Nach dem Qualitätsanspruch lassen sich die Werkstücke in Karosserieaußenhaut- und Karosserieinnenbauteile unterscheiden. Während bei den Außenteilen Oberflächengüte und Maßhaltigkeit dominieren, sind bei den Innenteilen Stabilität, Struktursteife, Festigkeit und Maßhaltigkeit Entwicklungsschwerpunkte. Unter Berücksichtigung des Leichtbauprinzips erfolgt die Werkstoffauswahl. Werden bei Außenteilen gut umformbare, weiche Stahlqualitäten oder Al-Mg-Si-Legierungen eingesetzt mit einer Streckgrenze im Bereich  $R_p = 120$  bis  $250$  MPa, sind es bei den Innenteilen die höherfesten und hochfesten, teilweise warm umformbaren Stahlwerkstoffe im Streckgrenzenbereich  $R_p = 300$  bis  $1200$  MPa. Die Blechdicken liegen im Feinblechbereich zwischen  $s_0 = 0,5$  bis  $2,0$  mm (Bild 1.2).

Der Inhalt des Buchprojekts befasst sich schwerpunktmäßig mit der optimierten, rechnergestützten Gestaltung des virtuellen Fertigungsprozesses, der nach der Übernahme erster Geometriedatenbasen der Bauteilentwicklung bereits beginnt. Mit der Entwicklung des für die erste Umformstufe erweiterten CAD-Modells wird unter Berücksichtigung der Werkstoff- und Technologie-Eingabegrößen ein in Optimierungsschleifen durchgeführter Prozess mittels FEM-Analyse begonnen, an dessen Abschluss die Arbeitsfolge eines Bauteils steht, das alle funktionellen und qualitativen Anforderungen erfüllt und Basis für die Werkzeugkonstruktion sein kann (Bild 1.3).



**Bild 1.3** Prinzip der virtuellen Fertigungsfolge-Gestaltung von Karosseriebauteilen

Die Umform- und Schneidwerkzeuge sind dominierender Bestandteil des Fertigungssystems im Karosserieteil-Fertigungsprozess. Ihre Auslegung und Anordnung in der Prozessfolge erfordern einen Planungsprozess, der ausgehend von der

Geometrieanalyse des Bauteils auf die Risiken der Beanspruchungsbedingungen, die Spannungszustände beim Umformen, besonders im ersten Hauptumformvorgang, und bei den Folgeoperationen schließen lässt.

Es sind die Spannungs- und Formänderungszustände der Umformverfahren Tiefziehen, Streckziehen, Formtiefen, Kragenziehen, Lochaufweiten sowie diverse Biegeverfahren, die sich häufig lokal überlagern und unter variablen Geometriebedingungen Fertigungsrisiken im Werkstück hervorrufen und die Werkstückqualität beeinträchtigen. Bereits der Bauteilkonstrukteur sollte durch fertigungsgerechtes Auslegen seines Bauteils die Fertigungsqualität positiv beeinflussen.

Durch eine enge Zusammenarbeit der Bauteilentwickler und Prozessgestalter im Simultaneous-Engineering-Prozess (SE-Prozess) werden auch für komplexe Karosseriebauteile die geforderte Qualität und eine robuste Fertigung ermöglicht.

Die theorieorientierten Kapitel 2 bis 5, besonders Kapitel 4, vermitteln die Kompetenz, riskante Geometriezonen des Bauteils und ihre Beanspruchungsbedingungen beim Umformen zu identifizieren und ergeben Schlussfolgerungen für Geometrieergänzungen zum Verändern der Beanspruchungsbedingungen, je nach geforderten Ergebnisziel.

Die Kapitel 6 bis 8 ergänzen methodische und organisatorisch-technische Informationen zur Qualitätssicherung, zur Prozessplanung, Maschinenauslegung und Transportautomatisierung.

Die Kapitel 2 bis 8 bilden die Voraussetzungen für Kapitel 9, die Methodenplanung und Fertigungsprozessgestaltung als Vorbereitung für die Konstruktion der Werkzeuge. Wesentliche Inhalte betreffen die virtuelle Ziehanlagen- und Wirkflächen-gestaltung für den Hauptumformvorgang sowie die virtuellen Anlagen der Werkzeugwirkflächen für die Folgeumform- und Folgeschneidwerkzeuge. Es werden zahlreiche methodisch-konstruktive Vorschläge zum Verbessern der Beanspruchungs- und Formänderungsbedingungen vorgestellt und diese an zahlreichen Praxisbeispielen erprobt. Die Vervollkommnung der Werkzeugprinzipien und des Fertigungsprozesses erfordert FE-Optimierungsschleifen, deren Effizienz die in Kapitel 4 erworbenen Kenntnisse zur Identifikation der Beanspruchungsbedingungen voraussetzen.

## ■ 1.2 Abriss zur historischen Entwicklung der Blechbranche im Automobilbau

Mit dem Beginn des Automobilbaus am Ende des 19. Jahrhunderts hatte die Blechbearbeitung auf kunsthandwerklicher Basis bereits eine Entwicklung von 4000 Jahren durchlaufen. Sie setzt als Ergebnis der ersten Verarbeitungsstufe das Halbzeug

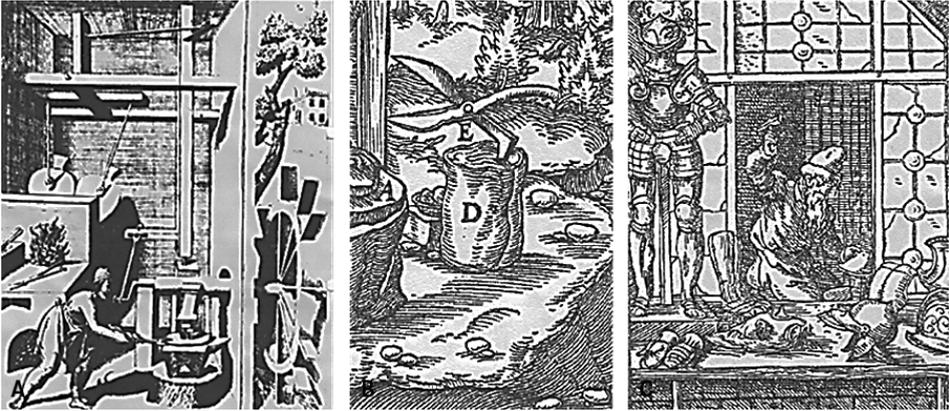
Blech voraus, dessen weitere Bearbeitung in einer zweiten Verarbeitungsstufe durch Verfahren des Umformens und Trennens zu einem Einzelteil führt. Die enge Verbindung der Herstellung und Verarbeitung von Blech lässt sich an der handwerklich-industriellen Entwicklung historischer Ereignisse einer sächsischen Erzgebirgsregion aufzeigen.

Es ist heute nicht genau nachweisbar, wann im Mittelalter die Herstellung von Schwarzblech im westlichen Erzgebirge begann. Als Folge der Ostkolonisation siedelten sich deutsche Bauern im 11. und 12. Jahrhundert bis in die hohen Kammernlagen des Erzgebirges an, die in Schwerstarbeit Waldflächen für den Feldanbau rodeten.

Es ist bekannt, dass Bauern in sogenannten Bauernrennfeuern Raseneisenerze zu Schmiedeeisen in der wachstumsarmen Jahreszeit verarbeiteten, um Werkzeuge und Waffen für den Eigenbedarf herzustellen. Die Bauern mussten landesherrschaftlichen Kriegsdienst leisten und eigenständig für den Besitz zweiteiliger Harnische aus Schwarzblech sorgen. Das Erzeugen von Schwarzblech mittels einfacher Schmiedetechnologien durch Blatner (Plattner) ist mit großer Sicherheit anzunehmen. Die Herstellung von Schmiedeeisen im Erzgebirge ist für das Jahr 1267 urkundlich nachgewiesen /1.02/.

In der Zeit vom 14. bis zum Beginn des 16. Jahrhunderts besaß in Deutschland die Oberpfalz das Monopol auf Eisenblech-Herstellung. In Amberg wurde das Schwarzblech geschmiedet. Wunsiedel war reich an Zinngruben und verfügte damit über die Basis zur Oberflächenveredelung gegen Korrosion. In Wunsiedel und Nürnberg gab es Zinnwerke, die das begehrte Weißblech herstellten. Ein Teil dieses Halbzeugs wurde von Klempnern (Flaschnern) zu Gegenständen des täglichen Bedarfs verarbeitet und ein Teil in andere Länder verkauft /1.03/. Die Zünfte der Blechbearbeiter besaßen in Süddeutschland zu damaliger Zeit hohes Ansehen. Bild 1.4 enthält Darstellungen mittelalterlicher Zünfte der Herstellung und Verarbeitung von Eisenblechen.

Für das Westerbeirge brachten die Herstellung und der Verkauf von Blechen durch den Einfluss des Nürnberger Metallhändlers ANDREAS BLAU um 1536 beträchtlichen Fortschritt. Eisen- und Zinnerze, Holz für Holzkohle sowie Wasserkraft für Hämmer, Gebläse und Windfrischanlagen waren reichlich im Erzgebirge vorhanden. Mit den aus der Oberpfalz angeworbenen Blechmeistern und den aus dem Umfeld von Nürnberg verpflichteten Zinnmeistern entwickelte sich das Blechschmieden zu einem bedeutenden Wirtschaftszweig, der durch seine Qualitätserzeugnisse an Schwarz- und Weißblechen bereits um 1560 über Ländergrenzen hinaus eine bedeutende Monopolstellung erlangte. Das aus Süddeutschland importierte technologische Fachwissen trug wesentlich zum Verbessern der Produktionsbedingungen bei. Bis zum Beginn des 18. Jahrhunderts besaßen geschmiedete Bleche aus dem Erzgebirge aufgrund ihrer Ebenheit und Umformbarkeit Weltruf /1.02/.



**Bild 1.4** Mittelalterliche Zünfte und Technologien der Blechherstellung und Blechverarbeitung

A: Schmieden der Bleche mit dem Schwanzhammer /1.04/

B: Stockschere zum Besäumen geschmiedeter Bleche /1.05/

C: Das Schmieden von Harnischsegmenten /1.06/

Unter dem Einfluss des Schneeberger Bergwerkbesitzers von CAROLSFELD wurde eine Genossenschaft, die „Erzgebirgische Blechkompanie“ gegründet, die einen Zusammenschluss aller Blechhämmer und Zinnwerke anstrebte und den Absatz der Blechhalbzeuge über Kaufleute aus Leipzig und Hamburg, selbst nach Übersee regelte /1.02/. Der größte Teil der im Westerzgebirge geschmiedeten Bleche wurde nach England exportiert /1.07/.



**Bild 1.5** Historisches Modell einer erzgebirgischen Löffelschmiede von H. Ranft

Der Bau der Hammerwerke war auf Tallagen mit Flussläufen angewiesen. In den Bergdörfern des Erzgebirges blühte die Blechwarenfertigung der Klempner, Flaschner und der Röhrenmacher. Ihre Erzeugnisse waren Lampen, Blechkannen, Krüge, Kerzenhalter, Ofenröhren oder ähnliche Waren des täglichen Bedarfs. Als ein inten-

sives Geschäftsfeld konnte sich die handwerkliche Löffelfertigung etablieren. In der Region um Schwarzenberg wurden 95 Löffelmacher von 50 Plattenschmieden mit dem notwendigen Halbzeug versorgt.



**Bild 1.6** Arbeitsfolgen der Löffelfertigung des 18. (a) und 19. (b) Jahrhunderts, Ausstellung im historischen Museum Schwarzenberg

Bild 1.5 zeigt das Modell einer Löffelschmiede, wie sie im Erzgebirge üblich war. Arbeitsfolgen der Löffelfertigung enthält Bild 1.6. Im 18. Jahrhundert war der Rohling ein Stab mit quadratischem Querschnitt. Eine rationellere Arbeitsfolge wurde im 19. Jahrhundert angewendet. Vom Plattenschmied wurden vorgeschmiedete Platten bezogen, die mit einer Schere oder mit einem Schneidwerkzeug zu besäumen waren. Nach dem Kalteinhämmern in die Löffelform wurde nachgefeilt und anschließend verzinkt. Verpackt in Seidenpapier kamen die Löffel zum Versand.

Die Technologie des Blechschmiedens veraltete mit der Einführung des Blechwalzens. Im Jahr 1769 hatte Heinrich Wilhelm Remy in der Eisenhütte Neuwied bei Koblenz das erste Blechwalzwerk nach englischem Vorbild in Betrieb genommen /1.03/. Anfang des 19. Jahrhunderts wurde in mehreren europäischen Ländern Stabeisen zu Blechen preiswert und in besserer Qualität gewalzt, als es durch das Blechschmieden erreicht werden konnte.

CARL GOTTHILF NESTLER gelang es erstmals 1826 in Wittigstal an der sächsisch-böhmischen Grenze, später in Erla bei Schwarzenberg, Schwarzbleche in wettbewerbsfähiger Qualität zu walzen. Dem sächsischen Eisenhüttenwesen war es um die Mitte des 19. Jahrhunderts nicht mehr möglich, mit den Fortschritten der technischen Revolution führender europäischer Länder mitzuhalten. Der wachsende Bedarf an Holz und Erz war nicht mehr zu decken. Die Nutzung von Koks als Energieträger für Hochöfen ging nur schleppend voran. Die Zollpolitik deutscher Länder führte zum Verlust von Absatzmärkten, und landesherrschaftliche Vorschriften behinderten den Aufbau fortschrittlicher Produktionsstrukturen. Die engen Tallagen des Erzgebirges schränkten die Erweiterung der Produktionsstätten ein. Selbst der Bau der für die damalige Zeit großen und modernen „Königin-Marien-Hütte“ mit der Einführung von Koks-Hochöfen in Cainsdorf bei Zwickau um 1840 brachte keine durchgreifende Besserung der Gesamtsituation. Der seit der Mitte des 18. Jahrhun-

derts enorm gestiegene Fortschritt Englands in der Produktion von Stahlhalbzeugen war bezüglich der Preisbildung nicht mehr zu kompensieren /1.08/.

Eine über Jahrhunderte gewonnene Vertrautheit und Kreativität der Blechhandwerker mit ihrem Material war eine wichtige Grundlage für neue Ideen und innovative Ansätze, die einen industriellen Aufschwung in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts in der Erzgebirgsregion hervorbrachten. Die zunehmende Industrialisierung in dieser Zeit war durch das fortschreitende Ersetzen handwerklich betriebener Gütererzeugung durch fabrikatorische Maschinenarbeit gekennzeichnet. Regionale Schwerpunkte entstanden dort, wo sich im 18. Jahrhundert Ansätze einer Manufaktur gebildet hatten. Das Halbzeug Blech bildete eine gute Basis für die Entwicklung und die Fertigung von Massenartikeln, wobei ungeeigneter Einsatz seinem Ruf als hervorragendem Material hinsichtlich Stabilität und Korrosion nicht immer zweckdienlich war.

Ein regionaler Schwerpunkt der Blechbearbeitung in Sachsen bildete sich im Gebiet Aue/Schwarzenberg heraus, wobei der Zusammenhang von Blechwaren-, Maschinen- und Werkzeugherstellung deutlich hervortritt und durch Kundennähe in Verbindung mit dem noch wenig entwickelten Verkehrswesen gefördert wurde /1.09/.

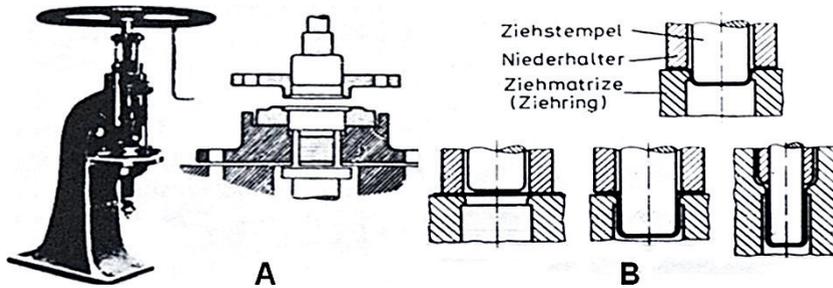
Mit der Erfindung des Argentans (Neusilbers) aus den ungenutzten Abfallprodukten des Auer Blaufarbenwerkes durch den Arzt und Hobby-Chemiker Dr. Ernst August GEITNER um 1823 verlagerte sich die Löffelproduktion in die aufblühende Industriestadt Aue. Christian WELLNER entwickelte die Technologie des Blechwalzens von Neusilber um 1850 und verarbeitete diesen Blechwerkstoff zu Massenartikeln. Seine Nachkommen ließen aus diesem Unternehmen in den folgenden 50 Jahren die größte Besteck- und Silberwarenfabrik Deutschlands mit 4500 Beschäftigten entstehen.

In die Zeit der Gründerjahre um 1870 bis 1890 fallen mit der Einführung der Gewerbe- und Zollfreiheit und dem Bau der Eisenbahnstrecke von Zwickau über Aue nach Schwarzenberg bedeutende Erfindungen der Blechbearbeitung mit dem zugehörigen Maschinenbau. So konnte 1878 der in Aue ansässige Fabrikant Erdmann KIRCHEIS ein Verfahrenspatent anmelden, dass die Blechumformung revolutionierte und die Grundlage für die Tiefziehtechnik bildete (Bild 1.7) /1.10/.

Einseitig offene Blechhohlkörper mussten nicht mehr mehrteilig gefügt oder durch aufwändige Treib- oder Drückarbeiten geformt werden. Sie konnten nunmehr sekundenschnell ausgehend vom ebenen Zuschnitt oder vom bereits vorgeformten Hohlkörper faltenfrei gefertigt werden. Nach dieser Technologie wurden bereits 1880 im Emaillierwerk Lauter/Erzgebirge Kochgeschirre durch Tiefziehen gefertigt.

Der 1830 in Aue geborene Erdmann KIRCHEIS lernte Schlosser und sammelte in namhaften Unternehmen Deutschlands umfangreiches Fachwissen. 1861 machte er sich selbstständig und baute zunächst für die Handwerker der umliegenden

Orte, die Blechwaren herstellten, einfache Maschinen, die die Arbeit erleichterten. Später produzierte er Kurbel- und Abkantpressen, Drückmaschinen und Kurbelscheren in breiter Sortimentsvielfalt. Großen und weltweiten Geschäftserfolg erzielte er mit der Entwicklung und dem Bau von Maschinen zur Fertigung und zum Verschließen von Konservendosen.

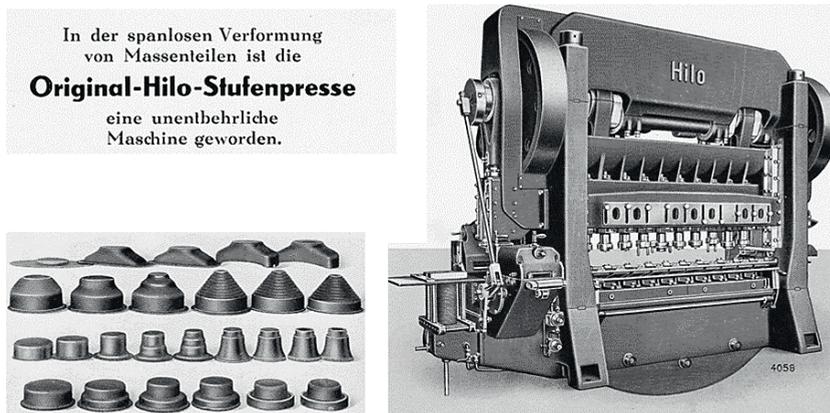


**Bild 1.7** Skizzen aus dem Verfahrenspatent „Tiefziehen“ von Erdmann KIRCHEIS

A: Spindelpresse mit Tiefziehwerkzeug

B: Prinzip des Tiefziehens, zugehörige Werkzeugteile, Anschlagzug bei Beginn und Ende des Ziehvorgangs, Prinzip des Weiterschlagziehens

Ebenso weltbekannt wurde das 1879 gegründete Unternehmen HILTMANN & LORENZ AG, das sich auf Großpressen und Großscheren spezialisierte. Eine Leistung besonderer Art stellt die als Weltneuheit in die Geschichte eingegangene Stufenpresse dar, die eine automatische Fertigung von Blechteilen für eine große Anzahl von Prozessstufen ermöglicht (Bild 1.8). Bereits 1910 kam eine vom Unternehmen HILTMANN & LORENZ AG entwickelte Stufenpresse bei Ford in Detroit zur Fertigung von Radkappen für Automobile zum Einsatz /1.11/.



**Bild 1.8** Stufenpresse des Unternehmens HILTMANN & LORENZ, Aue in Sachsen, mit Prozessfolgen für Stufenpressen geeigneter Blechteile (Firmenprospekt)

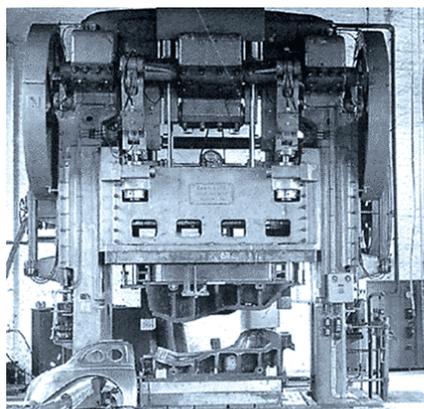
In der zwischen Aue und Schwarzenberg gelegenen Stadt Lauter wurde Ende des 19. Jahrhunderts das Unternehmen Gebr. GÖTZ gegründet, das mit seinen Pressenangeboten ebenfalls Weltruf erlangte. Eine Erzeugnisspezialität waren Probierpressen für Großteile des Automobilbaus.

Zahlreiche Patente zeugen davon, dass zu Beginn der Industrialisierung die Maschinenhersteller auch die erforderlichen Umform- und Schneidwerkzeuge fertigten und mit den Maschinen auslieferten. Der anwachsende Bedarf an Blechteilerzeugnissen führte zur Spezialisierung und Trennung zwischen den Unternehmen des Maschinen- und Werkzeugbaus. Bernhard HILTMANN, Bruder von Gustav HILTMANN (Pressenbau), gründete bereits 1882 in Aue ein Unternehmen für den Bau von Umform- und Schneidwerkzeugen, das ebenfalls weit über die Grenzen Deutschlands hinaus bekannt wurde und dessen Nachfolgeunternehmen unter dem Namen Auer Werkzeugbau GmbH heute noch Umform- und Schneidwerkzeuge der Blechbearbeitung fertigt.

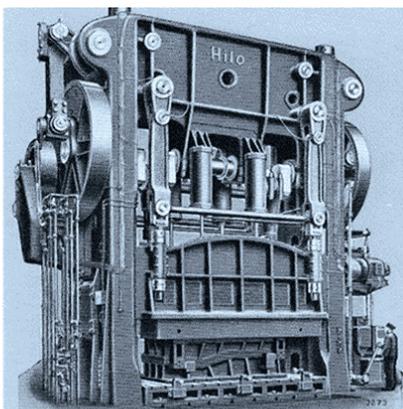
Mit der Entwicklung und Einführung von Ganzstahlkarossen hielt die Automobilbranche verstärkt Einzug in die Blechbearbeitung und vergrößerte die Formenvielfalt und Komplexität der Blechformteile. Die in Schwarzenberg angesiedelte und 1898 gegründete „Erzgebirgische Schnittwerkzeug und Maschinenfabrik“ GmbH (ESEM) erkannte den zukunftssträchtigen Trend des Automobil-Karosseriebaus rechtzeitig und stellte sich unbeirrt auf diese Entwicklung ein. In enger Zusammenarbeit mit den Pressenbauunternehmen aus Lauter und Aue wurden in den Jahren 1925 bis 1935 die wesentlichen Grundprinzipien des Karosseriewerkzeugbaus in Verbindung mit den konstruktiven Erfordernissen des Karosseriepressenbaus in der Region Aue/Schwarzenberg entwickelt, die für ihren prinzipiell konstruktiven Aufbau heute noch Gültigkeit besitzen.

Karosseriebauteile unterliegen je nach Komplexität der Ausführung unterschiedlichen Beanspruchungsbedingungen beim Umformen. Die notwendige Flanschumformung enthält lokale Bereiche des Tiefziehens, sodass ein Niederhalter zum Verhindern von Falten notwendig wird, der wiederum einen separaten Pressenstößel oder ein Ziehkissen erfordert. Zur damaligen Zeit waren doppelt wirkende Pressen mit mechanischen Antrieben Stand der Technik. Die notwendigen getriebetechnischen Anforderungen wurden von HILTMANN & LORENZ AG. und Gebr. Götz in gemeinsamer Entwicklungsarbeit mit der ESEM GmbH Schwarzenberg gelöst (Bild 1.9).

Bild 1.10 zeigt ein in der ESEM gefertigtes Ziehwerkzeug eines Pkw-Rückwandoberteils, bestehend aus Matrize, Niederhalter und Stempel, mit einem bei der Werkzeugerprobung gefertigten Ausfallmuster um 1935. Mit dem Blechhalter wird der Zuschnitt in der Ziehmatrize vorgeformt und das Werkstück bei annähernd gleicher Ziehtiefe mit dem Stempel fertig geformt. Um Faltenbildung zu vermeiden, werden zur Korrektur der Ziehspannung bereits Ziehleisten eingesetzt.



Probierpresse zur Werkzeugprüfung  
Fa. Gebr. Götz, Lauter (Sachs.)



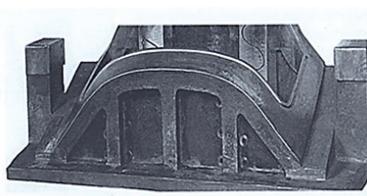
Karosserie-Ziehpresse  
Fa. HILTMANN & LORENZ A.-G., Aue (Sachs.)

**Bild 1.9** Großpressen für den Automobilbau aus dem Erzgebirge

Die ESEM profilierte sich in dieser Zeit zu einem der renommiertesten Großwerkzeughersteller des Kontinents. Bereits 1930 zählten die klangvollsten Adressen europäischen Automobilbaus zum Kundenkreis dieses Werkzeugbauunternehmens. Spitzenleistung waren die 1939 in der ESEM entwickelten und gebauten Werkzeuge für den ersten VW-Käfer. Die ersten einhundert Karosserieteile wurden in Schwarzenberg abgepresst (Bild 1.11) /1.12/.



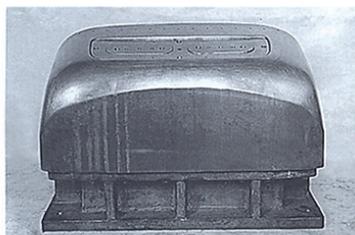
Ziehmatrize



Niederhalter

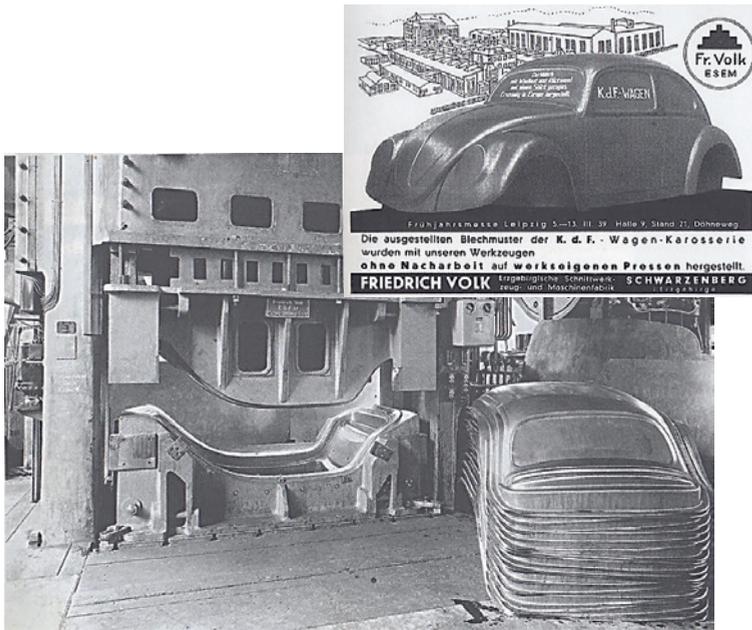


Ausfallmuster



Ziehstempel

**Bild 1.10** Ziehwerkzeug mit Ausfallmuster für Pkw-Rückwandoberteil, Hersteller: Erzgebirgische Schnittwerkzeug und Maschinenfabrik GmbH, ESEM – Schwarzenberg, Sachsen/1.12/



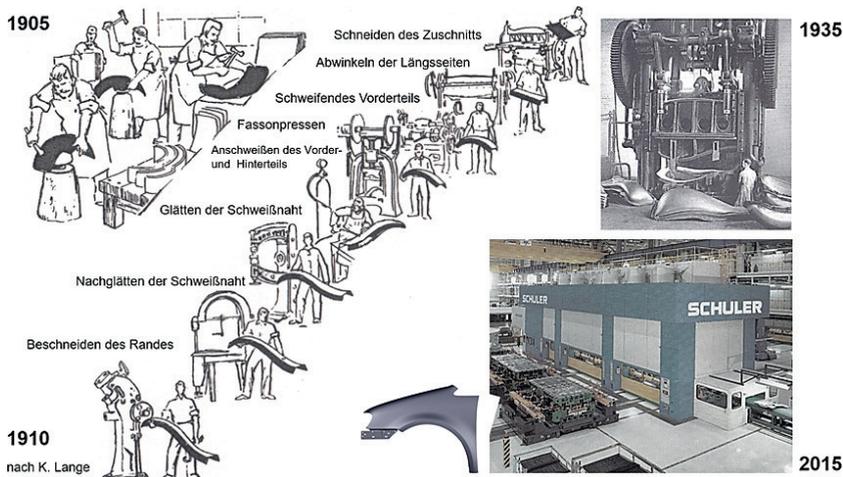
**Bild 1.11** Die Werkzeuge für den VW-Käfer wurden 1939 in der ESEM entwickelt und gefertigt, im Bild das Werkzeug und Teile der Dachfertigung /1.12/

Als Ergebnis des Zweiten Weltkrieges waren die vollständige Demontage der Unternehmen des Pressen- und Werkzeugbaus, ihre Enteignung nach dem damaligen sogenannten Volksentscheid und die Gründung der SDAG Wismut für den Uran-Abbau als Reparationsleistung an die Sowjetunion die Ursachen für den Niedergang des damals modernen erzgebirgischen Karosseriepressebaus. Die Werkzeugbaubetriebe erholten sich unter den Bedingungen der DDR-Wirtschaft nur langsam und versorgten vor allem zunächst Betriebe des Automobilbaus im Ostblock mit den erforderlichen Schneid- und Umformwerkzeugen. Mit dem vorhandenen Know-how konnten ab 1956 ebenso wieder namhafte Automobilfirmen des damals „nicht sozialistischen“ Wirtschaftsgebiets mit Karosseriewerkzeugen beliefert werden.

Die stürmische Entwicklung, die die Blechbearbeitung in Wechselwirkung mit dem Fortschritt des Automobilbaus in den vergangenen mehr als einhundert Jahren genommen hat, wird durch Etappen der Kotflügel fertigung in Bild 1.12 verdeutlicht.

Zur Produktion von Blechwaren des täglichen Bedarfs kamen in der Region des Erzgebirges mit dem Beginn des 20. Jahrhunderts Güter für die Automobilfertigung. Traditionsbetriebe der Blechteilefertigung nutzten diese Chance. Im erzgebirgischen Bernsbach übernahm das Unternehmen Schneider & Korb Aufträge zur Kotflügel fertigung seit Anfang des Automobilbaus. Zu Beginn wurden diese

Erzeugnisse traditionell mit Hammer und Amboss, ausgehend von ebenen Blechzuschnitten mittels Treiben in Form gebracht und von Hand beschnitten. Wenige Jahre später kamen bereits einfache Maschinen und Hilfseinrichtungen zum Einsatz, die in der Prozessfolge aneinandergereiht Arbeitserleichterungen erbrachten /1.10/. Erst Mitte der 1930er Jahre kamen Tiefziehwerkzeuge in Verbindung mit eigens dafür entwickelten Ziehpressen zur Anwendung, die eine neue Phase des Fortschrittes beim Umformen einleiteten und eine verbesserte Gestaltungsfreiheit der Bauteile ermöglichten. Moderne Maschinensysteme ermöglichen heute die Fertigung komplexer CAD-Konstruktionen von Werkzeugen und Karosseriebauteilen, deren Fertigung mittels FEM mit hoher Effizienz optimiert wurde.



**Bild 1.12** Kotflügelherstellung im Zeitraum von 1905 bis 2015

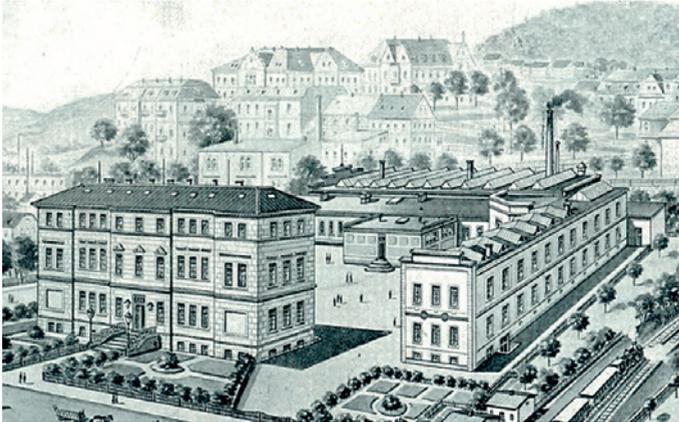
## ■ 1.3 Ausbildung qualifizierter Fachkräfte

Die aufstrebenden Industrieunternehmen der Gründerjahre erforderten in den letzten 20 Jahren des 19. Jahrhunderts auf dem Gebiet der Blechbearbeitung dringend qualifizierte Fachkräfte für Erzeugnisentwicklung (Formgestaltung), Maschinen- und Werkzeugentwicklung sowie für die Betriebsführung. Man musste sich jedoch noch in der Phase des industriellen Aufschwungs Jahrzehnte damit abfinden, dass man Blechmaterialien mittels Krafteinwirkung lediglich durch Wärmeintrag in höheren Temperaturbereichen bleibend verformen konnte. Über Vorgänge im Inneren des Materials, über energetische Anforderungen und über Ursachen des Werkstoffversagens gab es keine Kenntnisse. TRESKA hatte zwar

den Sonderfall einer Fließbedingung 1867 gefunden /1.13/, es fehlten jedoch Kenntnisse über das Materialverhalten. Lehrunterweisungen konnten nur auf Praxiserfahrungen und allgemeinen naturwissenschaftlichen Grundkenntnissen aufbauen. Die Hochschulen orientierten sich zur damaligen Zeit noch auf eine allgemeine und zweckfreie Forschung, es existierte keine unmittelbare Verbindung zwischen Industrie und Wissenschaft /1.14/.

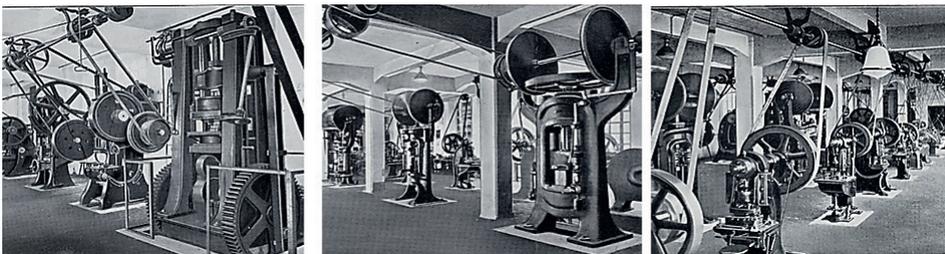
In dieser Situation half sich die Industrie eigenständig. Mittels privater Initiativen gründete man branchenbezogene Ausbildungsstätten. 1873 hatte sich in Frankfurt a. M. der „Verein Deutscher Blechverarbeiter“ formiert, der kurz darauf die Gründung einer branchenbezogenen höheren Bildungsstätte beriet. Als Standort bestimmt wurde 1876 in Leipzig von einer gewählten Gründungskommission mit Stimmenmehrheit das damalige Zentrum der Blechbearbeitung, die Erzgebirgsstadt Aue. Hauptinitiator der Bildungseinrichtung war der Maschinenbau-Fabrikant KIRCHEIS, der den Hauptanteil der Finanzierung mit dem Sächsischen Ministerium des Inneren verhandelte, nachdem er die kostenfreie Erstausrüstung der Labore zusicherte. Die Stadt Aue stellte den Baugrund kostenfrei zur Verfügung und der Rest der Bausumme wurde von Unternehmen der Blechbranche zur Verfügung gestellt. Die Grundsteinlegung für die Einrichtung war Anfang 1877, und der Lehrbetrieb konnte am 1. Oktober 1877 aufgenommen werden. Voraussetzung für die Aufnahme der Studierenden war das abgeschlossene 17. Lebensjahr, eine fachbezogene Lehrausbildung, wenigstens eine zweijährige Berufserfahrung und die bestandene Aufnahmeprüfung /1.15/.

Zielstellung des Kuratoriums der Ausbildungseinrichtung war es zunächst, junge Gewerbetreibende der Blechbearbeitung mit theoretisch-technischen, kunstgewerblichen, kaufmännischen und praktischen Kenntnissen auszubilden. Dafür wurden Dozenten für die allgemeinbildenden naturwissenschaftlichen Fächer, für Kunstgeschichte, Zeichnen und Modellieren, für Mechanik, Technologie und Entwerfen sowie für Kostenrechnung und Buchführung /1.16/ aus allen Gebieten Deutschlands berufen. Für eine tiefgründige Praxisausbildung waren Obermeister des Blechhandwerks zuständig. Die Studiendauer belief sich zunächst auf drei Semester bei wöchentlich 50 vollen Unterrichtsstunden. Hierbei war die Hälfte der Lehrereinheiten für den theoretischen Unterricht, die andere Hälfte für die Praxisausbildung vorgesehen. In den Semesterferien konnte zusätzlich die Prüfung als Industriemeister in einem der angebotenen Fachgebiete abgelegt werden. Die Studierenden kamen aus ganz Deutschland, etwa 15% aus angrenzenden europäischen Ländern. Die Matrikellisten verzeichnen Studierende aus Russland und den USA.



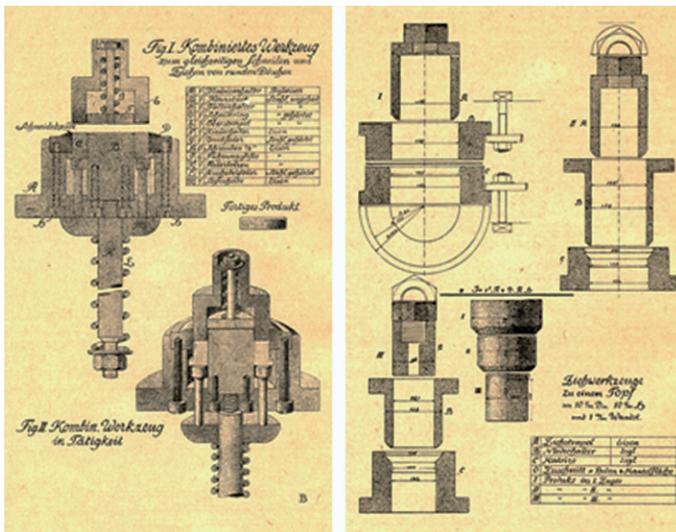
**Bild 1.13** Höhere Fachschule für Blechbearbeiter in Aue/Sachsen um 1915

Der gegründete Fachschulverein und das Kuratorium waren größtenteils aus Geschäftsführern renommierter Unternehmen der Blechverarbeitung und des Maschinenbaus zusammengesetzt. Es wurde streng darauf geachtet, dass die vermittelten Lehrinhalte dem schnell wachsenden technischen Fortschritt standhielten. Besonders die Laboreinrichtungen wurden zunehmend erweitert. Bild 1.13 zeigt links vorn das Schulgebäude und rechts sowie dahinter den Bau für die praktische Ausbildung im Zustand von 1915. Das dahinterliegende Gebäude wurde später um ein Stockwerk vergrößert. In dieser Zeit bestanden die Fachrichtungen Bauklempnerei, Gas- und Sanitärinstallation, industrielle Massenfertigung und Werkzeugbau sowie Elektroinstallation. Das Maschinenlabor wurde durch Spenden deutscher Pressenhersteller ständig erweitert /1.17/. Unter den Spendern findet man Namen wie KIRCHEIS und HILTMANN & LORENZ, Aue, die Gebrüder GÖTZ und die Gebrüder KUX, Lauter, Henry PELS, Erfurt, das Unternehmen SCHULER A.G. Göppingen, SCHATZ A.G., Weingarten sowie KNEUSEL, Zeulenroda (Bild 1.14).



**Bild 1.14** Pressenauswahl um 1920 in der Laborhalle der Fachschule /1.17/

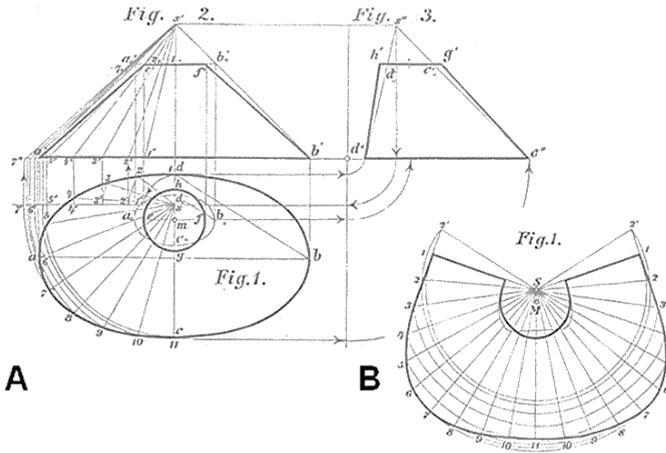
Das Bild 1.15 zeigt von Studierenden angefertigte Werkzeugzeichnungen, die in der mechanischen Werkstatt der Fachschule unter Mitwirkung der Studierenden angefertigt wurden und für Lehrvorführungen genutzt werden konnten. Ein wichtiges Ziel der Lehreinrichtung war das Vermitteln erweiterter handwerklicher Fertigkeiten unter Berücksichtigung des neuesten Standes der Technik, der in der damaligen Zeit im schnellen Wandel begriffen war. Eine enge Zusammenarbeit zwischen der Lehreinrichtung, dem Handwerk und der Industrie waren ständig erforderlich, um die bereits mit einer abgeschlossenen Lehrausbildung aufgenommenen Studierenden neben den theoretischen Fächern auch praxisnah weiter zu qualifizieren. In den Praxislehrveranstaltungen waren anspruchsvolle Gegenstände aus Blech anzufertigen, für die die Studierenden vorher die Zeichnung einschließlich der Abwicklung des Werkstücks anfertigten.



**Bild 1.15**

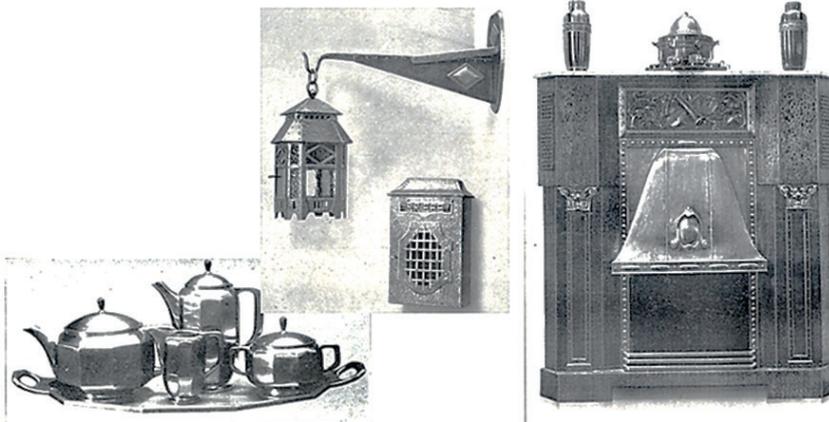
Von Studierenden angefertigte Zeichnungen für Ziehwerkzeuge /1.17/

Bei der Eröffnung der Lehreinrichtung dominierte die vom Handwerk geförderte kunsthandwerkliche Ausbildung gegenüber den theoretischen Fächern. Da sich der Werkstoff Blech sehr gut zur Fertigung von Massenartikeln eignet, war es das Bestreben der Industrie, für Massengüter zunehmend Gesichtspunkte der Rationalisierung der Fertigung in die Lehrprogramme aufzunehmen. Die Dokumente der ersten fünf Jahrzehnte des Bestehens der Fachschule zeigen, dass sich der Konflikt zwischen Handwerk und Industrie auch im Ausbildungsbereich nicht reibungslos vollzog. Hierbei spielte die Rüstungsindustrie beider Weltkriege, bei der es auf große Stückzahlen ankam, eine wesentliche, wenn auch unrühmliche Rolle.

**Bild 1.16**

Geometrische Darstellung eines Lampenschirms (A) und die davon abgeleitete Abwicklung (B) aus dem Modellbuch für Blechbearbeiter der Höheren Deutschen Fachschule Aue /1.18/

Bild 1.16 zeigt die geometrische Darstellung eines Lampenschirms (A) und die davon abgeleitete Abwicklung (B) aus dem Modellbuch der Fachschule. Bild 1.17 zeigt von Studierenden gestaltete und in den Semesterferien ausgeführte Arbeiten /1.19/.



**Bild 1.17** Studentische Semesterarbeiten der Höheren Fachschule für Blechbearbeitung in der praktischen Ausbildung um 1915 /1.19/

Der Fortschritt in Wissenschaft und Technik forderte die Weiterentwicklung der Lehrprogramme und die Aufnahme neuer Fächer zugunsten der theoretischen Ausbildung. Mittels Großdieselmotor und Generator hatte der Lehrbetrieb seine eigene Stromversorgung. Labore für Elektro-, Gas- und Wasserinstallation sowie für galvanische Oberflächentechnik kamen dazu.

Neben der Praxisausbildung und den Lehrvorführungen in den Laboren mussten die anwachsenden theoretischen Grundlagen vermittelt werden. So entwickelte sich zunehmend eine theoretisch orientierte Bildungseinrichtung, die traditionsgemäß zusätzlich umfangreiche Praxiskenntnisse vermittelte. 1943 erhielt sie den Status einer Ingenieurschule, die 1947 geschlossen wurde.

Die höhere Fachschule für Blechbearbeitung hat aufgrund ihres Standortes die Entwicklung der industriellen Teilefertigung der Blechbranche sowie ihres Maschinen- und Werkzeugbaus im Westerzgebirge beträchtlich gefördert. Die Ursache bestand in der engen Wechselbeziehung zwischen der Bildungseinrichtung und den Unternehmen der Industrie. Die Geschäftsführer der Unternehmen waren in den Gremien der Fachschule vertreten und konnten unmittelbar auf die Gestaltung der Lehrprogramme Einfluss nehmen. Andererseits wurde die Bildungseinrichtung über Stiftungen und Spenden von den Industrieunternehmen finanziert.

Die Unternehmen des Pressen- und Werkzeugbaus sowie der Blechteilefertigung im Erzgebirge besaßen am Ende des Zweiten Weltkrieges ein hohes technisches Niveau. Auf politischen Beschluss hin wurden sie demontiert und enteignet. Damit war auch die Basis für den weiteren Bestand der Bildungseinrichtung entzogen. Die Trennung Deutschlands in die Ost- und Westzone, die Bildung einer Sperrzone im Bereich Aue/Johanngeorgenstadt in Folge des beginnenden Uranerzabbaus als Reparationsleistung an die Sowjetunion trugen das Ihre zur Schließung der einzigartigen Bildungseinrichtung bei. Fachkräfte und Spezialisten bereicherten mit ihrem Können einschlägige Unternehmen in der aufblühenden Wirtschaft Westdeutschlands. Hermann Golle /1.11/ kommentiert in seinem Buch „Das Know-how, das aus dem Osten kam“ diesen Tatbestand eindrücklich. Einzelne Fachrichtungen der aufgelösten Ingenieurschule für Blechbearbeitung Aue wurden anderen Ingenieurschulen in Sachsen und Thüringen angegliedert.

## ■ Literatur

- /1.01/ Spur, G.: Optimierung des Fertigungssystems Werkzeugmaschine, München: Hanser 1972
- /1.02/ Altmann, G.: Erzgebirgisches Eisen, Geschichte - Technik - Volkskultur, Sächsisches Druck- und Verlagshaus AG, 1999
- /1.03/ Johannsen, O.: Geschichte des Eisens, Verlag Stahleisen M. B. H., Düsseldorf, 1924
- /1.04/ Vogel, O.: Über die Entwicklung und den gegenwärtigen Stand der Weiss-Blecherzeugung, Sonderdruck aus „Stahl und Eisen“, Nr. 29, Düsseldorf, 1909
- /1.05/ Agricola, G.: De re Metallica, Basel, 1556 (fol. 210)
- /1.06/ Amman, J.: Das Ständebuch, Insel-Verlag Anton Kippenberg, 1975 (Nachdruck)
- /1.07/ Riebel, H.: Beiträge zur Geschichte der sächsischen Eisenindustrie Inaugural-Dissertation, Universität Leipzig, 1933

- /1.08/ Matthes, E.: Anfänge der Blechwalzerei in Sachsen, Sonderdruck aus „Stahl und Eisen“ 80 (1960) Heft 7, Seite 437 bis 441
- /1.09/ Beitrag Stadtverwaltung Aue: Industrielle Entwicklung im Auer Tal, Verlag Mike Rockstroh, 1998
- /1.10/ Lange, K.: Blechbearbeitung, wt - Z. ind. Fert. 72 (1982) Nr. 10, Seite 237 bis 242
- /1.11/ Golle, H.: Das Know-how, das aus dem Osten kam, Hohenheim Verlag, Stuttgart-Leipzig, 2002
- /1.12/ Festschrift zu 100 Jahre Werkzeugbau in Schwarzenberg, 1898 - 1998
- /1.13/ Tresca, H.: Abhandlungen über das Fliessen fester Körper, Ann. du conservatoire des arts et metiers, Comptes rendus, 1867
- /1.14/ Nipperdey, T.: Die Organisation der Wissenschaften im Wilhelminischen Berlin und ihre Beziehung zur Wirtschaft, In IHK zu Berlin, Hg. Berlin und seine Wirtschaft, Berlin und New York 1987
- /1.15/ Festbericht zum 25. Jubiläum der Deutschen Fachschule für Blecharbeiter Aue, Archivmaterial des Rates der Stadt Aue, 1902
- /1.16/ Lehrangebot der Abteilung C: Schmitte- und Stanzenbau der Deutschen Fachschule für Blecharbeiter Aue von 1915, Archivmaterial des Rates der Stadt Aue
- /1.17/ Festschrift zum fünfzigjährigen Bestehen der Höheren Fachschule für Metall-Bearbeitung und Installation 1927, Archivmaterial des Rates der Stadt Aue
- /1.18/ Modellbuch für den Blecharbeiter, Verlag C. M. Gärtner, Schwarzenberg, Hg. Höhere Deutsche Fachschule für Metallbearbeitung und Installation, 12. Auflage, um 1920
- /1.19/ Programm der Höheren Deutschen Fachschule für Installation und Metall-Bearbeitung Aue, 1936, Archivmaterial des Rates der Stadt Aue

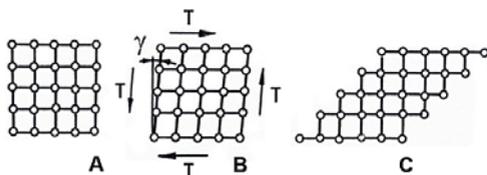


# 2

## Umformtechnische Grundlagen

### ■ 2.1 Umformmechanismus

Beim Abkühlen der Metalle aus der Schmelze entsteht im Allgemeinen ein Vielkristallgefüge. Die Kristalle bestehen aus einer Gitterstruktur, die sich aus Elementarzellen zusammensetzt. Die Elementarzellen besitzen unterschiedliche Atomanordnungen, sie können abhängig vom Metallwerkstoff im Gitter kubisch raumzentriert, kubisch flächenzentriert, hexagonal oder tetragonal angeordnet sein. Durch das Aneinanderreihen der Elementarzellen werden Gitterebenen gebildet, deren Anzahl von der Gitterstruktur abhängig ist und die Umformbarkeit des Werkstoffs beeinflusst. Entlang der Gitterebenen findet die Umformung statt, und je mehr Gitterebenen oder Gleitsysteme vorhanden sind und je kleiner der Abstand der Atome im Gleitsystem ausfällt, umso besser eignet sich der Werkstoff für die Umformung.



**Bild 2.1**

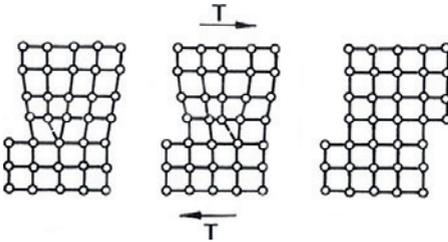
Verformungszustände

A) ohne Verformung B) elastische Verformung

C) plastische Verformung

Wirken auf ein Kristallgitter äußere Kräfte oder Momente ein, entstehen im Inneren Normal- und Schubspannungen. Bild 2.1 zeigt unterschiedliche Verformungszustände eines Kristallgitters im Querschnitt. Darstellung A) zeigt das unbelastete Kristallgitter, bei dem noch keine Verformung stattgefunden hat. Bei B) wird durch äußere Belastung zunächst eine Gitterverzerrung durch die entlang der Gitterebenen wirkende Schubspannung  $T$  hervorgerufen. Wird das Werkstück entlastet, federt das Gitter vollständig in die Ausgangslage zurück. Die Verformung des Werkstücks liegt damit im elastischen Bereich. Erreicht jedoch die Schubspannung den kritischen Wert  $T_f$ , setzt ein Abgleiten von Atomen an den Gitterebenen um ein oder mehrere Atomabstände ein. Nach der Entlastung gibt es keine Umkehr in die Aus-

gangslage. So entsteht, wie bei C) dargestellt, eine plastische Verformung. Das Abgleiten der Atome findet bevorzugt auf Ebenen dichtester Atombesetzung statt. Es verschieben sich nicht alle Atome einer Ebene gleichzeitig, der Gleitvorgang geht von Fehlstellen oder Gitterbaufehlern, im Werkstoff vorhandener *Versetzungen*, aus.



**Bild 2.2**

Wandern einer Stufenversetzung bei plastischer Verformung

Die praktisch vorhandenen Schubspannungen zum Einleiten des Umformens sind beträchtlich kleiner, als sie aufgrund der ermittelten Atombindungskräfte am idealen Gitter auftreten dürfen. Die Ursachen liegen in den vorhandenen Gitterfehlstellen oder Versetzungen. Der Gleitvorgang findet bevorzugt auf Ebenen dichtester Kugelpackung statt, wobei er von den Versetzungen ausgeht.

Eine einfache Stufenversetzung zeigt die schematische Darstellung in Bild 2.2. Kommt es durch die kritische Schubspannung, die *Fließschubspannung*  $T_f$ , zur Platzänderung der Atome, wird die Versetzung geschlossen oder wandert als Kettenreaktion fort, bis sich die Versetzung am Rand des Kristallits auflöst. Beim Umformen werden neue Versetzungen gebildet, und die Versetzungsdichte steigt mit zunehmendem Umformgrad. Daraus resultiert die ansteigende Kaltverfestigung des Werkstoffs beim Umformen.

Die durch Umformen eines Werkstücks hervorgerufenen Formänderungen sind durch geeignete Kenngrößen zu quantifizieren. So ist z.B.  $\varepsilon$  die Dehnung eines Zugstabes, der von der Anfangslänge  $l_0$  auf die Endlänge  $l_1$  gereckt wird:

$$\varepsilon = \frac{l_1 - l_0}{l_1} \quad 2.1$$

In der Umformtechnik findet diese sogenannte technische Dehnung lediglich für spezielle Betrachtungen des elastischen Bereichs Anwendung, da sie wichtige Anforderungen der Umformtechnik nicht vollständig erfüllt. Diese vier Anforderungen können wie folgt formuliert werden:

- Vergrößerungen sollen mit einem positiven Vorzeichen (+) und Verkleinerungen mit einem negativen Vorzeichen (-) versehen werden.
- Bei Richtungsumkehr der Umformung soll der gleiche Absolutwert vorliegen.
- Die Summe von gestuften Einzelformänderungen muss dem Wert entsprechen, der bei gleichen Anfangs- und Endbedingungen in einem Umformvorgang erreicht wird.

- Die Formänderungen in Koordinatenrichtung müssen dem Gesetz der Volumenkonstanz entsprechen.

Diese Anforderungen erfüllt der Umformgrad  $\varphi$ , der sich durch Integration des differentiellen Ansatzes von momentaner Längenänderung bezogen auf die momentane Länge  $l$  in den Grenzen von  $l_0$  und  $l_1$  ergibt. Danach ist:

$$d\varphi_l = \frac{dl}{l} \quad 2.2$$

Und:

$$\varphi_l = \int_{l_0}^{l_1} \frac{dl}{l} = \ln l_1 - \ln l_0 = \ln \frac{l_1}{l_0} \quad 2.3$$

Damit ist der Umformgrad  $\varphi$  der natürliche Logarithmus des Verhältnisses von einer Endabmessung zur Anfangsabmessung. Im  $x$ -,  $y$ -,  $z$ -Koordinatensystem ergeben sich dann die Umformgrade zu  $\varphi_x$ ,  $\varphi_y$  und  $\varphi_z$ .

Für inkompressible Werkstoffe bleibt neben der Masse auch das Volumen konstant. Das Volumen der Endform  $V_1$  entspricht dem Volumen der Anfangsform  $V_0$ . Man spricht vom *Gesetz der Volumenkonstanz*.

$$V_1 = V_0 \quad V = \text{const.} \quad 2.4$$

Aus dem Volumen der Endform kann das Volumen der Anfangsform berechnet werden. Bei einigen Verfahren der Blechumformung, bei denen die Blechdicke annähernd konstant bleibt, kann mit Oberflächenkonstanz gerechnet werden.

Aus dem Gesetz der Volumenkonstanz lässt sich ableiten:

$$\frac{x_1}{x_0} \cdot \frac{y_1}{y_0} \cdot \frac{z_1}{z_0} = \frac{V_1}{V_0} = 1$$

Logarithmiert ergibt das:

$$\ln \frac{x_1}{x_0} + \ln \frac{y_1}{y_0} + \ln \frac{z_1}{z_0} = \ln 1 = 0$$

Oder:

$$\varphi_x + \varphi_y + \varphi_z = 0 \quad 2.5$$

Aufgrund der Volumenkonstanz ist die Summe der drei Umformgrade null. Sind zwei berechnete oder gemessene Umformgrade vorhanden, kann der dritte Umformgrad berechnet werden.

Ein Beispiel aus der Blechumformung soll dieses Ergebnis vertiefen. Auf eine Blechoberfläche wird vor dem Umformen ein Messkreis mit dem Anfangsdurch-

messer  $d_0$  aufgetragen. Durch Umformen wird aus dem Kreis eine Ellipse mit dem großen Durchmesser  $d_1$  und dem kleinen Durchmesser  $d_2$ . Zu berechnen ist die mittlere Blechdicke  $s_1$  innerhalb der Ellipsenfläche.

Es sind:  $\varphi_1 = \ln \frac{d_1}{d_0}$  und  $\varphi_2 = \ln \frac{d_2}{d_0}$  sowie  $\varphi_3 = \varphi_s = \ln \frac{s_1}{s_0}$ .

Mit  $\varphi_x + \varphi_y + \varphi_z = 0$  2.5

ergibt sich:  $\ln \frac{s_1}{s_0} = -(\varphi_1 + \varphi_2)$  bzw.  $s_1 = s_0 \cdot e^{-(\varphi_1 + \varphi_2)}$ .

Besonders Prozesse des Kaltumformens werden von der Geschwindigkeit ihres Ablaufs beeinflusst. Als Umformgeschwindigkeit ist sie von der inneren Verschiebegeschwindigkeit der Werkstoffteilchen abhängig, und mit  $\dot{\varphi}$  ist sie als Änderung des Umformgrades nach der Zeit definiert:

$$\dot{\varphi} = \frac{d\varphi}{dt} \text{ in s}^{-1} \quad 2.6$$

Für die Koordinatenrichtungen  $x, y$  und  $z$  gilt aufgrund der Volumenkonstanz:

$$\dot{\varphi}_x + \dot{\varphi}_y + \dot{\varphi}_z = 0 \quad 2.7$$

In der praktischen Anwendung wird die mittlere Umformgeschwindigkeit  $\dot{\varphi}_m$  aus dem Quotienten der Differenzwerte des Umformgrades  $\Delta\varphi$  und des Zeitintervalls  $\Delta t$ , in dem sich der Umformgrad ändert, gebildet:

$$\dot{\varphi}_m = \frac{d\varphi}{dt} \text{ in s}^{-1} \quad 2.8$$

Von besonderem Interesse ist der Zusammenhang zwischen der Werkzeug- oder Stößelgeschwindigkeit  $v$  z. B. in mm/s und der Umformgeschwindigkeit  $\dot{\varphi}$  in 1/s. Als Beispiel sei der Dehnvorgang eines Flachzugstabes (Bild 2.3) angeführt. Das Querhaupt der Zug-Druck-Prüfmaschine bewegt sich mit der Geschwindigkeit  $v_Q$ . Damit ist:

$$v_Q = \frac{dl}{dt} \text{ und } \dot{\varphi} = \frac{d\varphi_l}{dt}$$

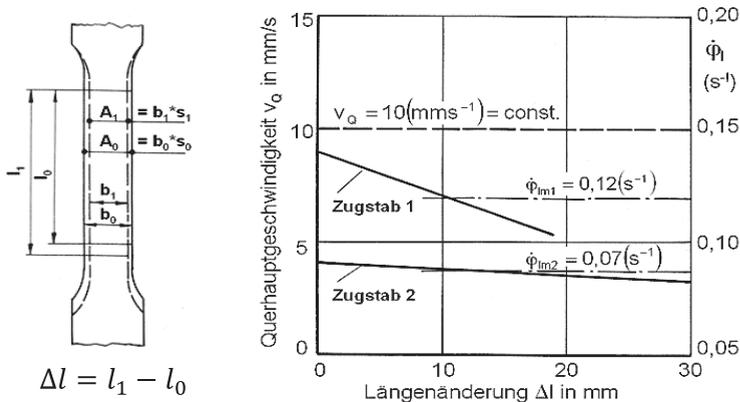
Mit  $d\varphi_l = \frac{dl}{l}$  folgt:

$$\dot{\varphi}_l = \frac{d\varphi_l}{dt} = \frac{dl}{l \cdot dt} = \frac{v_Q}{l} \quad 2.9$$

Beim Dehnen eines Zugstabes wird die Umformgeschwindigkeit  $\dot{\varphi}_l$  von der Querhauptgeschwindigkeit  $v_Q$  und von der momentanen Dehnlänge  $l$  beeinflusst.

Werden z. B. zwei Zugstäbe mit den Anfangsdehnlängen  $l_{01} = 75$  mm und  $l_{02} = 120$  mm um 25 % gedehnt, wobei das Querhaupt eine konstante Geschwindigkeit  $v_Q =$

10 mm/s aufweist, ergeben sich die in Bild 2.3 dargestellten abnehmenden Verläufe der Umformgeschwindigkeit abhängig von der Dehnlängenzunahme  $\Delta l$ . Die mittleren Umformgeschwindigkeiten betragen für beide Zugstäbe  $\dot{\varphi}_{lm1} = 0,12$  1/s und  $\dot{\varphi}_{lm2} = 0,074$  1/s.



**Bild 2.3** Querschnittsgeschwindigkeit im Vergleich zum Verlauf der Umformgeschwindigkeit

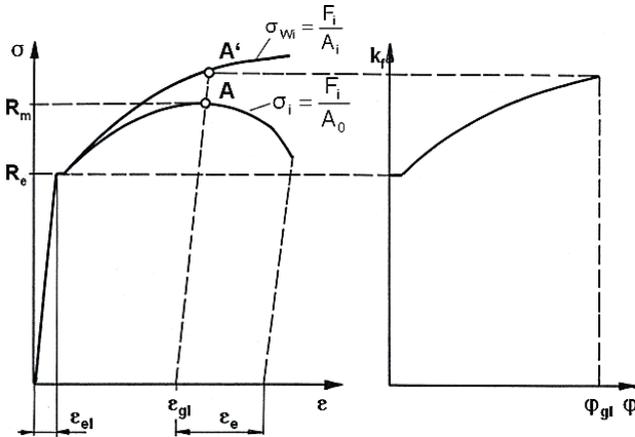
## ■ 2.2 Umformfestigkeit und Fließkurve

Die zum Erreichen der bleibenden Formänderung erforderliche Mindestfließspannung  $\sigma_f$  ist prinzipiell mit der Streckgrenze  $R_e$  des jeweiligen Werkstoffs identisch. Die Fließspannung verändert sich mit zunehmendem Umformgrad infolge der Kaltverfestigung und weiterer Vorgänge beim Umformen. Zur Ermittlung des Kraft- und Arbeitsbedarfs der Umformverfahren ist eine universelle Kenngröße erforderlich, mit der das Fließverhalten des Werkstoffs in der Umformzone mit hinreichender Genauigkeit erfasst werden kann. Hierfür existiert in der Umformtechnik eine eigenständige Kenngröße, die *Umformfestigkeit*  $k_f$  oder *Fließspannung*  $\sigma_f$ .

Die Umformfestigkeit bzw. Fließspannung eines Werkstoffs bestimmter Zusammensetzung und Vorbehandlung ist die zum Einleiten und Weiterführen des plastischen Werkstoffflusses erforderliche Spannung im einachsigen, bzw. die Vergleichsspannung bei mehrachsigen Spannungszustand. Sie hängt von der Art und Zusammensetzung des Werkstoffs, vom Gefügebau des Werkstoffs und den jeweiligen Umformbedingungen ab. Das sind:

- der Umformgrad  $\varphi$ , bei Mehrachsichtigkeit der *Vergleichsumformgrad*  $\varphi_v$
- die Umformgeschwindigkeit  $\dot{\varphi}$ , ausgedrückt durch die *Vergleichsumform-Geschwindigkeit*  $\varphi_v$
- die Umformtemperatur  $\delta$

Der Funktionsverlauf  $k_f = f(\varphi_v, \dot{\varphi}_v, \delta)$  wird als *Fließkurve* des Werkstoffs bezeichnet. Auf dem Gebiet der Blechumformung wird die Fließkurve verfahrensabhängig hauptsächlich im Zugversuch mit der Flachzugprobe oder in Sonderfällen im Flachstauchversuch bzw. mit dem hydraulischen Einbeultest ermittelt.



**Bild 2.4** Entwicklung der Fließkurve aus dem wahren Spannungs-Dehnungs-Diagramm

Die folgende Betrachtung zeigt eine im Zugversuch aufgenommene Fließkurve nach DIN 10 002 mit einer Flachzugprobe (DIN 50 114). Sie wird über das wahre Spannungs-Dehnungs-Diagramm entwickelt. Die in Bild 2.4 links dargestellten Kurvenverläufe  $\sigma = f(\varepsilon)$  zeigen die fiktive Spannung  $\sigma_i$  und die wahre Spannung  $\sigma_w$  in Abhängigkeit von der Dehnung  $\varepsilon$ . Beiden gemeinsam ist der Bereich der elastischen Verformung, die *Hooke'sche Gerade*, bis zum Erreichen der Fließgrenze  $R_e$ . Beginnend bei  $R_e$  dehnt sich der Zugstab gleichmäßig über die gesamte Dehnlänge bis zum Maximum A bzw. bis zu A', dem Bereich der Gleichmaßdehnung. Der untere Kurvenverlauf charakterisiert die fiktive Spannung  $\sigma_i$ . Die von der Zug-Druck-Prüfmaschine gemessenen Kraftwerte  $F_i$  werden auf den Anfangsquerschnitt des Messbereichs der Probe  $A_0 = b_0 s_0$  bezogen.

Im Punkt A erreicht die Funktion ihr Maximum, hier beginnt die Einschnürung der Dehnlänge an einer Stelle, die Gefügestabilitäten aufweist. Punkt A entspricht der Zugfestigkeit  $R_m$  des Werkstoffs. Bis zu diesem Spannungswert dominiert die Kaltverfestigung des Werkstoffs gegenüber der Querschnittsabnahme am Zugstab. Für die Zugfestigkeit  $R_m$  gilt:  $\frac{d\sigma}{d\varepsilon} = 0$ . Im Bereich der Einschnürdehnung dominiert die Querschnittsabnahme gegenüber der Zunahme der Kaltverfestigung. Der obere Kurvenverlauf entspricht der wahren Spannung  $\sigma_w$ . Die gemessenen Kraftwerte  $F_i$  werden auf die tatsächliche Querschnittsfläche  $A_i$  bezogen. Damit ist:

$$\sigma_{wi} = \frac{F_i}{A_i} \quad 2.10$$

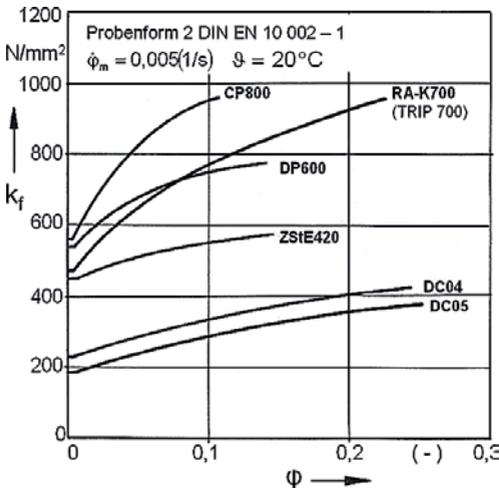
Der an der Dehnlänge der Probe befindliche Dehnungsgeber ermittelt zu den jeweiligen Kraftwerten  $F_i$  die momentanen Änderungen der Anfangsmesslänge  $l_0$ . Mit  $l_i = l_0 + \Delta l_i$  wird auf der Basis des Gesetzes der Volumenkonstanz die momentane Querschnittsfläche mit der Formel 2.11 berechnet.

$$A_i = A_0 \cdot \frac{l_0}{l_i} \quad 2.11$$

Die wahre Spannung  $\sigma_w$  ist im Bereich der Gleichmaßdehnung die Basis für die Fließkurve, da nur bis  $A'$  ein einachsiger Spannungszustand gewährleistet ist. Für  $\sigma_w$  wird  $k_f$  eingeführt, und der Umformgrad  $\varphi_i$  ergibt sich zu:

$$\varphi_i = \ln \frac{l_i}{l_0} = \ln \frac{l_0 + \Delta l_i}{l_0} = \ln(1 + \varepsilon_i) \quad 2.12$$

Die Diagramme in Bild 2.5 zeigen beispielhaft Fließkurven moderner Stahlblech-Werkstoffe im Dickenbereich  $s_0 = 0,9$  bis  $1,1$  mm, die bei Raumtemperatur und einer mittleren Umformgeschwindigkeit  $\dot{\varphi}_m = 0,005$  1/s aufgenommen wurden. Fließkurven können für Umformwerkstoffe Werkstoffkatalogen entnommen werden /2.01./, /2.02./. Für kritische und genaue Untersuchungen spezieller Werkstoffchargen wird die Aufnahme von Fließkurven empfohlen.



**Bild 2.5**

Fließkurven für weiche, höherfeste und hochfeste Stahlblech-Werkstoffe, Nennblechdicke  $s_0 = 0,9$  bis  $1,1$  mm

Für die meisten Stähle und Nichteisenmetalle kann der Einfluss von  $\varphi_v$  und  $\dot{\varphi}_v$  auf die Umformfestigkeit  $k_f$  gut durch die empirische Beziehung

$$k_f = C \varphi_v^n \left( \frac{\dot{\varphi}_v}{1s^{-1}} \right)^m \quad 2.13$$

angenähert werden. Hierbei sind die Werkstoffkenngrößen  $C = k_f$  für  $\varphi_v = 1$  und  $\dot{\varphi} = 1$  als Fließkurvenfaktor,  $n$  als Verfestigungsexponent und  $m$  als Geschwindigkeitsexponent, abhängig von der Umformtemperatur. Für die Kohlenstoffstähle C10...C60 veranschaulicht die Tabelle in Bild 2.6 diese Abhängigkeiten.

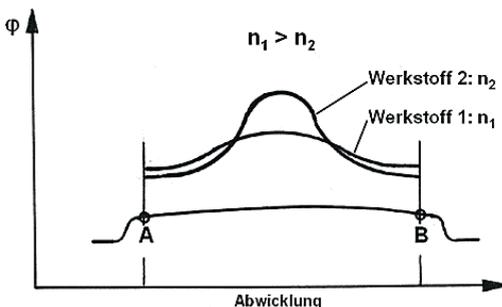
Umformtemperatur $\delta$ in °C	Fließkurvenfaktor C in MPa	Verfestigungsexponent (-)	Geschwindigkeitsexponent (-)
20	700...1.200	0,15...0,25	0,02...0,04
700	200...350	0,05...0,10	0,08...0,12
1.200	40...80	~0	0,14...0,20

**Bild 2.6** Abhängigkeit der Werkstoffkenngrößen  $C$ ,  $n$  und  $m$  von der Umformtemperatur am Beispiel der Stähle C10 bis C60 /2.03 /

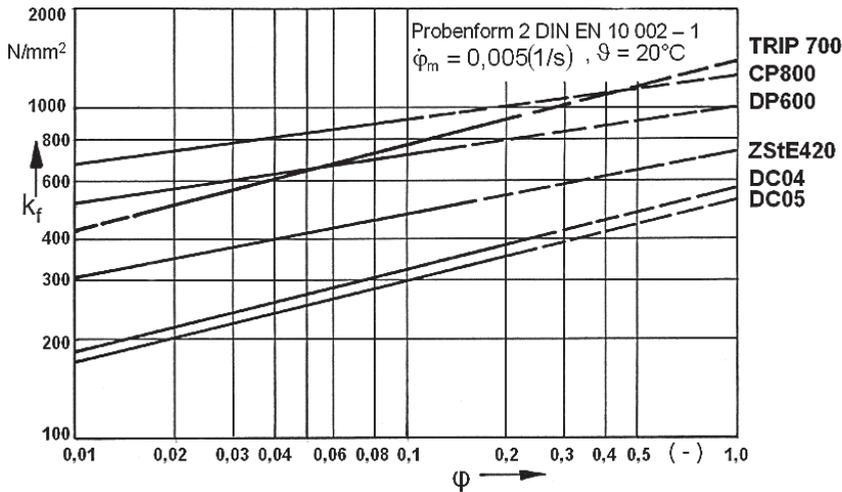
Aus der Tabelle ist ablesbar, dass die Umformgeschwindigkeit bei der Warmumformung nahezu so großen Einfluss ausübt wie die Kaltverfestigung bei der Kaltumformung. Als Näherung für die Kaltumformung wird für in Formel 2.13 der Geschwindigkeitsexponent  $m = 0$  gesetzt, damit vereinfacht sich die Beziehung zur von LUDWIG vorgeschlagenen Formel:

$$k_f = C \varphi_v^n \quad 2.14$$

In der Blechumformung wird der *Verfestigungsexponent*  $n$ , auch als *n-Wert* bezeichnet, eine bedeutende Werkstoffkenngröße. Mit der Charakteristik der Verfestigungsneigung des Werkstoffs gibt er Hinweise auf die Beanspruchbarkeit des Werkstoffs bei Streckziehbeanspruchung. Ein Blechwerkstoff mit großem  $n$ -Wert (große Verfestigungsneigung) erzielt beim Umformen eine gleichmäßigere Formänderungsverteilung im Werkstück als ein Werkstoff mit kleinerem  $n$ -Wert, bei dem im Streckziehprozess eher eine Formänderungskonzentration zu erwarten ist. Bild 2.7 kennzeichnet schematisch diesen Zusammenhang für den Bereich A - B eines Türenaußenbleches.



**Bild 2.7**  
Formänderungsverteilung für Blechwerkstoffe mit unterschiedlichem  $n$ -Wert



**Bild 2.8** Fließkurven für Stahlblech-Werkstoffe in doppelt logarithmischer Darstellung

Bild 2.8 vermittelt die in Bild 2.5 enthaltenen Fließkurven, doppelt logarithmisch dargestellt. Für die Blechwerkstoffe konnte für  $0,01 < \varphi < 0,2$  im Bereich der Gleichmaßdehnung in guter Annäherung Linearität angenommen werden. Für den Bereich der Einschnürung ist mit Abweichungen zu rechnen, obwohl gerade in der Blechumformung Umformgrade im Bereich  $0,2 > \varphi > 0,5$  anzutreffen sind. Eine effiziente Nutzung der Fließkurven in der Computertechnik fordert eine möglichst hinreichend genaue mathematische Näherung, obwohl eine punktweise Eingabe aktueller Fließkurvenfunktionen von modernen Simulationsprogrammen der Blechumformung ebenso Akzeptanz findet.

Aus Bild 2.5 ergibt sich für das fiktive Spannungs-Dehnungs-Diagramm:

$$\sigma = \frac{F}{A_0} = \frac{F \cdot A}{A \cdot A_0} = \frac{F}{A} \cdot \frac{l_0}{l} = k_f \cdot e^{-\varphi} = C \cdot \varphi^n \cdot e^{-\varphi} \quad 2.15$$

Für  $\varphi = \varphi_{gl}$  gilt  $\sigma = R_m$  sowie  $\frac{d\sigma}{d\varphi} = 0$ .

$$\sigma = \frac{F}{A_0} = \frac{F \cdot A}{A \cdot A_0} = \frac{F}{A} \cdot \frac{l_0}{l} = k_f \cdot e^{-\varphi} = C \cdot \varphi^n \cdot e^{-\varphi}$$

Die Formel 2.15 für Punkt „A“ differenziert ergibt:

$$\frac{d\sigma}{d\varphi} = 0 = C \left[ n \cdot \varphi^{n-1} \cdot e^{-\varphi} - \varphi^n \cdot e^{-\varphi} \right]$$

Da für viele weiche unlegierte und niedrig legierte Stähle  $\varphi_{gl} = n$  gilt, ist schließlich:

$$C = \left( \frac{e}{n} \right)^n \cdot R_m \quad 2.16$$

Oder:

$$k_f = \left(\frac{e}{n}\right)^n R_m \varphi^n \quad 2.17$$

Nicht alle Umformwerkstoffe weisen für Formel 2.17 geradliniges Verhalten auf. Zum Beispiel zeigen rostfreie Stähle, mehrere Aluminiumlegierungen, Magnesiumlegierungen und Kupferwerkstoffe einen von einer Geraden abweichenden Funktionsverlauf. Hier besteht die Möglichkeit einer Annäherung von Formel 2.17 für Bereiche des Umformgrades  $\varphi$  mit genäherten Verfestigungsexponenten  $n$ , in Abhängigkeit vom jeweils vorliegenden Fall der Beanspruchung des Werkstücks.

Es sind weitere Beziehungen zur Approximation von Fließkurven veröffentlicht. Beispiele dafür sind in /2.04/ enthalten.

SWIFT (für weiche Stahlwerkstoffe):

$$k_f = A(B + \varphi)^n \quad 2.18$$

VOCE (für Al u. Al-Legierungen):

$$k_f = A - (A - B)e^{-m\varphi} \quad 2.19$$

GOSH (X5CrNi 18.9):

$$k_f = A(B + \varphi)^n - C \quad 2.20$$

Die Konstanten A, B, C, m und n sind jeweils vom Werkstoff abhängige Größen.

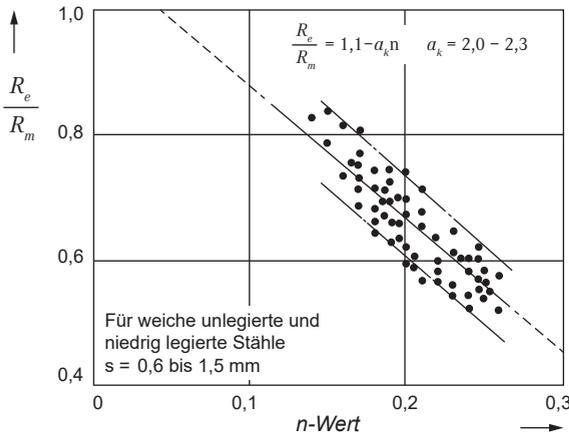
Bei Werkstücken, die vorwiegend einer Streckziehbeanspruchung unterliegen, sollte der Konstrukteur bereits bei der Werkstoffauswahl auf einen hohen  $n$ -Wert achten. Vom Blechhersteller werden für gelieferte Werkstoffchargen meist nur die Werte für die Zugfestigkeit  $R_m$  und die Streckgrenze  $R_e$  bzw.  $R_p$  angegeben. Für eine Reihe von Werkstoffen korreliert das Streckgrenzenverhältnis  $R_e/R_m$  bzw.  $R_p/R_m$  mit dem  $n$ -Wert.

Bei fehlendem  $n$ -Wert ist für weiche unlegierte, höherfeste und hochfeste Stähle sowie Aluminiumlegierungen, seine angenäherte Ermittlung über das Streckgrenzenverhältnis möglich. Für den Praxisbedarf reicht ein auf diesem Weg abgeschätzter Verfestigungsexponent  $n$  häufig aus.

Das Bild 2.9 zeigt die Abhängigkeit des Streckgrenzenverhältnisses vom  $n$ -Wert für eine Reihe weicher unlegierter und höherfester Stahlwerkstoffe im Blechdickenbereich  $s_0 = 0,6$  bis 1,5 mm. Über einen längeren Zeitraum durchgeführte Messreihen ergaben die überschlägige Formel 2.21.

$$\frac{R_e}{R_m} = 1,1 - a_k n \quad 2.21$$

Mit  $a_k = 2,0 - 2,3$



**Bild 2.9**

Korrelation des Streckgrenzenverhältnisses  $R_e/R_m$  mit dem  $n$ -Wert für weiche unlegierte und niedrig legierte Stähle /2.05/

## ■ 2.3 Mehrachsigkeit der Beanspruchung, Fließbedingungen, Fließgesetz

Der einachsige Spannungszustand ist ein Spezialfall. Deswegen sind Fließbedingungen erforderlich, die einen Bezug der einachsigen zur mehrachsigen Umformung herstellen. Es sind die Bedingungen, die im Werkstück den Übergang zur Plastifizierung des Werkstoffs bei Mehrachsigkeit kennzeichnen. Damit gilt für die bei einachsigen Spannungszustand ermittelte Fließspannung  $k_f$ :

Bei  $k_f = \sigma_V$  beginnt der Werkstoff zu fließen, er wird plastisch. Für die Berechnung der Vergleichsspannung stehen unterschiedliche Hypothesen zur Verfügung.

### Schubspannungshypothese nach TRESCA

Sie besagt, dass Fließen eintritt, wenn die Differenz zwischen der größten und kleinsten Hauptspannung gleich der Vergleichsspannung  $\sigma_V$  und damit der Fließspannung  $k_f$  ist.

$$k_f = \sigma_{VT} = \sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_{max} - \sigma_{min} \quad 2.22$$

Die Vergleichsspannung  $\sigma_{VT}$  ist von der mittleren Hauptnormalspannung  $\sigma_2$  unabhängig.

### Schubspannungshypothese nach v. MISES

Die Vergleichsspannung nach v. MISES basiert auf der Gestaltänderungs-Energiehypothese. Sie lautet für den allgemeinen Fall:

$$\sigma_V = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2] + 3(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)} \quad 2.23$$

Für die Hauptspannungen (Schubspannungen sind gleich null) gilt:

$$\sigma_V = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \quad 2.24$$

In Formel 2.24 wird der Einfluss der mittleren Spannung  $\sigma_2$  berücksichtigt. Experimente von LODGE, ROS und EICHINGER bestätigen den Einfluss der mittleren Hauptspannung auf den Fließbeginn des Werkstoffs. Es wird nachgewiesen, dass der Unterschied zwischen den Vergleichsspannungen nach Formel 2.22 und Formel 2.23 maximal 15% beträgt, wenn die Bedingung

$$\sigma_2 = \sigma_m = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) \quad 2.25$$

erfüllt ist. Hierfür gilt:

$$\sigma_{VM} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_{VT} = 1,15 \sigma_{VT} \quad 2.26$$

Aufgrund ihrer Einfachheit findet die Vergleichsspannung nach TRESCA häufig bei Spannungsermittlungen von Verfahren der Blechumformung unter Nutzung des Korrekturwertes  $\sigma_{VM}/\sigma_{VT} = 1,15$  Anwendung.

Um den Grad der Umformung auch durch eine Formänderungskenngröße auszudrücken, wird analog zur Vergleichsspannung der *Vergleichsumformgrad*  $\varphi_V$  ermittelt. Für die Umformgrade der Hauptrichtungen ist nach v. MISES:

$$\varphi_V = \sqrt{\frac{2}{3}(\varphi_1^2 + \varphi_2^2 + \varphi_3^2)} \quad 2.27$$

Nach TRESCA gilt:

$$\varphi_V \approx \varphi_{max} \quad 2.28$$

### Fließgesetz

Das *Fließgesetz* behandelt den Zusammenhang zwischen Formänderungskenngrößen und Spannungen bei Mehrachsigkeit der Beanspruchung. LEVY und v. MISES stellten einen Bezug zwischen dem Verhältnis der Änderungen der Hauptumformgrade  $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$  und dem Verhältnis der Spannungsdeviationen  $S_1, S_2, S_3$  her. Allgemein gilt für die Spannungsdeviation:

$$S_i = \sigma_i - \sigma_m \text{ mit } \sigma_m = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \quad 2.29$$

Mit den Änderungen der Hauptumformgrade gilt:

$$d\varphi_1 : d\varphi_2 : d\varphi_3 = S_1 : S_2 : S_3 \quad 2.30$$

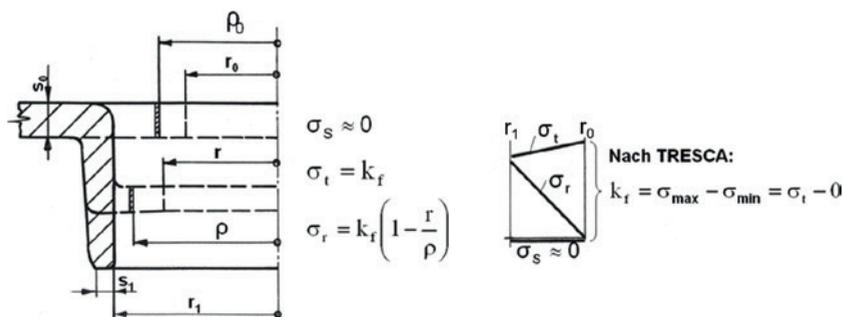
Für die Umformgeschwindigkeiten der auf die Zeiteinheit bezogenen Änderungen der Umformgrade gilt dann:

$$\dot{\varphi}_1 : \dot{\varphi}_2 : \dot{\varphi}_3 = S_1 : S_2 : S_3 \quad 2.31$$

Wenn während des jeweils gesamten Umformvorgangs das Verhältnis der Spannungsdeviationen annähernd konstant bleibt, können die Differentiale der Umformgrade bzw. die Umformgeschwindigkeiten durch die Umformgrade ersetzt werden, somit gilt:

$$\varphi_1 : \varphi_2 : \varphi_3 = S_1 : S_2 : S_3 \quad 2.32$$

Ein Beispiel soll die Anwendung des Fließgesetzes vertiefen. Beim Ziehen von Kragen liegt ein ebener Spannungszustand vor. Es soll berechnet werden, welche Blechdicke des Kragenrandes  $s_1$  am Ende der Umformung vorliegt (Bild 2.10).



**Bild 2.10** Geometriegrößen und Spannungen beim Kragenziehen

Der Lochanfangsradius  $r_0$  wird beim Umformen über den momentanen Radius  $r$  bis zum Endradius  $r_1$  geweitet, wobei folgende Spannungen bekannt sind:

$$\sigma_s = \sigma_n = 0 \text{ (Spannung in Normal- oder Blechdickenrichtung)}$$

$$\sigma_r = k_f \left( 1 - \frac{r}{\rho} \right) \text{ (Spannung in Radialrichtung)}$$

$$\sigma_t = k_f \text{ (Spannung in Tangentialrichtung)}$$

Da das Verhältnis der Spannungsdeviationen während des Umformens annähernd konstant bleibt, gilt nach dem Fließgesetz:

$$\frac{\varphi_s}{-\frac{1}{3}(\sigma_r + \sigma_t)} = \frac{\varphi_t}{\frac{1}{3}(2\sigma_r - \sigma_t)} \text{ mit } \sigma_m = -\frac{1}{3}(\sigma_r + \sigma_t)$$

$$\frac{\varphi_s}{\varphi_t} = \frac{-\sigma_m}{2\sigma_t - \sigma_r} = -\frac{\sigma_t + \sigma_r}{2\sigma_t - \sigma_r} = -\frac{2\rho - r}{\rho + r}$$

Da für den Kragenrand  $\rho = r$  gilt, ergibt sich:

$$\frac{\varphi_s}{\varphi_t} = -\frac{1}{2}$$

Die Umformgrade  $\varphi_s$  und  $\varphi_t$  ergeben sich zu:

$$\varphi_s = \ln \frac{s_1}{s_0} \text{ mit } \varphi_t = \ln \frac{r_1}{r_0}$$

Damit wird:

$$\ln \frac{s_1}{s_0} = \ln \frac{r_1}{r_0} \cdot \left( -\frac{1}{2} \right)$$

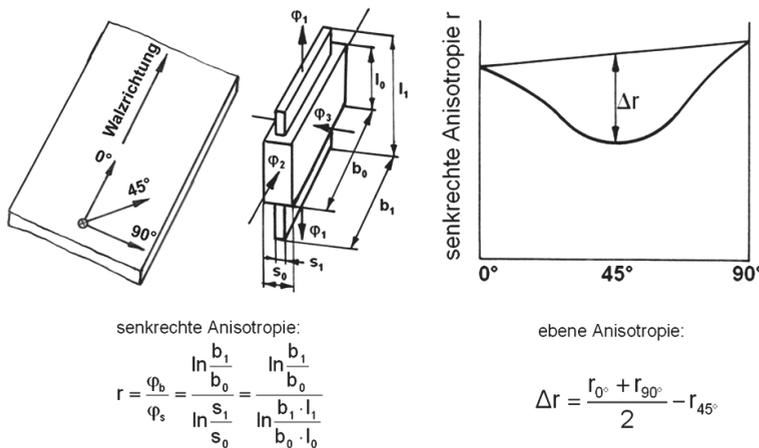
Delogarithmiert, ergibt sich für die Blechdicke  $s_1$  am Kragenrand:

$$\frac{s_1}{s_2} = \left( \frac{r_1}{r_0} \right)^{-\frac{1}{2}} \text{ mit } s_1 = s_0 \sqrt{\frac{r_0}{r_1}}$$

## ■ 2.4 Anisotropie der Blechwerkstoffe

Bisherige Betrachtungen gingen vom *quasiisotropen* Verhalten kristalliner Körper aus. Das bedeutet, dass der Werkstoff in allen Richtungen die gleichen Umform-eigenschaften aufweist. Durch Umform- oder Glühbehandlungen der Werkstoffe kann jedoch eine richtungsorientierte Anordnung der Kristalle, eine Textur, hervorgerufen werden. So führen die beim Walzen des Bleches hervorgerufenen plastischen Verformungen zur Ausrichtung der Körner und zu Walztexturen. Es ergeben sich richtungsabhängige, anisotrope Eigenschaften der Blechwerkstoffe. In der Blechumformung unterscheidet man zwischen der „senkrechten Anisotropie“ und der „ebenen Anisotropie“ (Bild 2.11).

Das Maß für die Anisotropie der plastischen Eigenschaften ist die senkrechte Anisotropie  $r$ . Diese Werkstoff-Kenngröße, auch als  $r$ -Wert bezeichnet, wird im Zugversuch im Bereich der Gleichmaßdehnung ermittelt.



**Bild 2.11** Senkrechte Anisotropie  $r$  und ebene Anisotropie  $\Delta r$

Die senkrechte Anisotropie ist definiert als das Verhältnis der Umformgrade von Breiten- und Dickenrichtung. Die Änderung der Blechdicke wird mittels Volumenkonstanz über die Dehnlänge berechnet. Danach ist:

$$r = \frac{\varphi_b}{\varphi_s} = \frac{\ln \frac{b_1}{b_0}}{\ln \frac{s_1}{s_0}} = \frac{\ln \frac{b_1}{b_0}}{\ln \frac{b_1 \cdot l_1}{b_0 \cdot l_0}} \quad 2.33$$

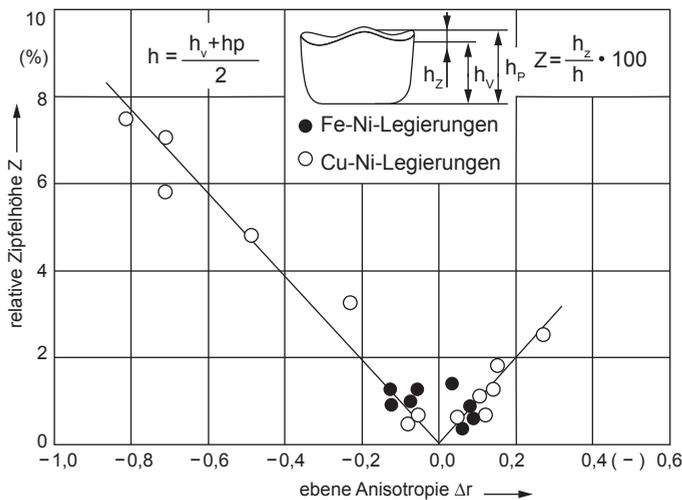
Bei  $r = 1$  liegt isotropes Verhalten des Blechwerkstoffs vor. Für  $r > 1$  fließt der Werkstoff bevorzugt aus der Probenbreite, der Dickenformänderung wird größerer Widerstand entgegengesetzt. Bei Werten  $r < 1$  fließt der Werkstoff vornehmlich aus der Blechdicke, was zu früherem Eisdrehen und Werkstoffversagen führen kann.

Allgemein weist der  $r$ -Wert in unterschiedlicher Lage der Probe zur Walzrichtung variable Werte auf. Aus diesem Grund ist eine Mittelwertbildung üblich, die sich aus vier Zugproben ergibt. Die Proben werden  $0^\circ$ ,  $90^\circ$  und  $2 \times 45^\circ$  zur Walzrichtung dem Blechmaterial entnommen. Daraus ergibt sich der mittlere Wert der senkrechten Anisotropie  $r_m$  zu:

$$r_m = \frac{r_0 + 2r_{45} + r_{90}}{4} \quad 2.34$$

Die Richtungsabhängigkeit des  $r$ -Wertes in der Ebene wird als ebene Anisotropie  $\Delta r$  bezeichnet, danach ist:

$$\Delta r = \frac{r_0 + r_{90}}{2} - r_{45} \quad 2.35$$

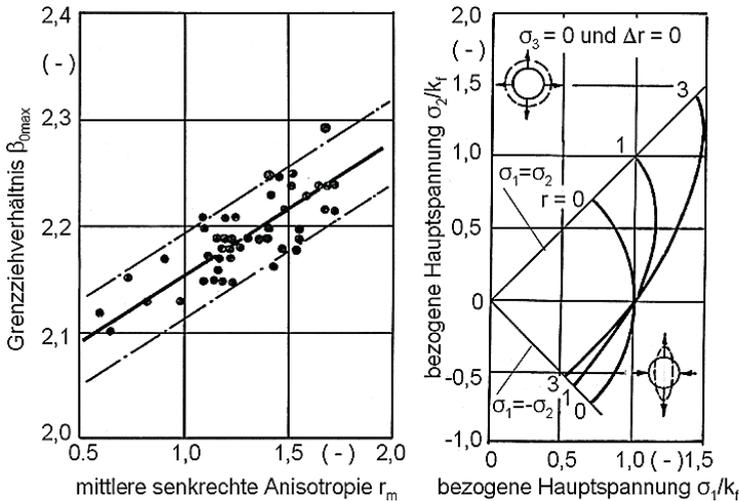


**Bild 2.12** Zipfelhöhe  $Z$  abhängig von der planaren Anisotropie  $\Delta r$  für unterschiedliche Nickelblechwerkstoffe

Auswirkungen der planaren Anisotropie können beim Tiefziehen von rotationssymmetrischen Hohlkörper Zipfelbildungen, Blechdickendifferenzen und Abweichungen von der Kreisform der Zarge ergeben. In Bild 2.12 ist für eine Auswahl unterschiedlicher nickellegierter Blechwerkstoffe die relative Zipfelhöhe  $Z$  abhängig von der planaren Anisotropie eines rotationssymmetrischen Ziehstücks dargestellt. Große Zipfelhöhen erfordern zusätzlichen Materialbedarf bei gleichzeitig

eingeschränkter Maßhaltigkeit. Deshalb sind für die planare Anisotropie Werte um  $\Delta r \approx 0$  anzustreben.

Quasiisotrope Stähle mit wahllos orientierten Kristalliten können mittels Zugabe von Titan (0,01 bis 0,04%), eines optimierten Kalt- und Warmwalzgrades sowie durch Glühen im Haubenofen hergestellt werden /2.06/.



**Bild 2.13** Einfluss der mittleren senkrechten Anisotropie auf das Umformergebnis beim Tiefziehen

Werkstoffe mit zunehmendem  $r$ -Wert verbessern das Grenzziehverhältnis. Diese Tatsache kann mit der Fließortkurve für variable  $r$ -Werte nachgewiesen werden.

Die Fließbedingung nach Formel 2.23 ergibt für isotrope Werkstoffe und den beim Tiefziehen angenommenen ebenen Spannungszustand ( $\sigma_3 = 0$ ):

$$k_f = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1\sigma_2} \quad 2.36$$

HILL/2.07/ schlug 1948 eine Fließhypothese für einen anisotropen Spannungszustand vor. Hierbei sind  $\sigma_0$  und  $\sigma_{90}$  die Fließspannungen in den Achsen  $0^\circ$  und  $90^\circ$  zur Walzrichtung. Es gilt folgende Beziehung für die Fließspannungen und  $r$ -Werte:

$$\frac{\sigma_0}{\sigma_{90}} = \sqrt{\frac{r_0(1+r_{90})}{r_{90}(1+r_0)}} \quad 2.37$$

Für den Fall, dass die Hauptrichtungen der Spannungen mit den Achsen der Probenentnahmen für die senkrechte Anisotropie übereinstimmen, gilt:

$$k_f = \sqrt{\sigma_1^2 - \frac{2r_0}{1+r_0}\sigma_1\sigma_2 + \frac{r_0(1+r_{90})}{r_{90}(1+r_0)}\sigma_2^2} \quad 2.38$$