

Umformtechnik Plastomechanik und Werkstoffkunde

Herausgegeben von

W. Dahl, R. Kopp und O. Pawelski
unter Mitwirkung von R. Pankert

Mit 882 Abbildungen

Verlag Stahleisen
Düsseldorf

Springer-Verlag
Berlin Heidelberg New York
London Paris Tokyo Hong Kong
Barcelona Budapest

Inhalt

	Vorwort	VII
	Formelzeichenliste	1
Teil A	Einleitung	19
	<i>Von W. Dahl und R. Kopp</i>	
Teil B	Grundlagen der Plastomechanik	
B 1	Einführung	27
	<i>Von D. Besdo</i>	
B 2	Tensornotation	30
	<i>Von J. Betten</i>	
B 2.1	Einführung	30
B 2.2	Einige Grundlagen zur Tensorrechnung in allgemeinen	32
	Koordinaten	
B 2.2.1	Basisvektoren, Metrik­tensoren	33
B 2.2.2	Zur Darstellung von Vektoren und Tensoren	35
B 2.2.3	Christoffel-Symbole	37
B 2.2.4	Kovariante Ableitung mit Anwendungen	38
B 2.2.5	Irreduzible Invarianten	42
B 2.3	Konforme Abbildungen	43
B 2.3.1	Holomorphe Funktionen	44
B 3	Grundlagen der Prozeßbeschreibung	49
B 3.1	Grundbegriffe der Plastomechanik	49
	<i>Von D. Besdo</i>	
B 3.1.1	Der einachsige Zugversuch	49
B 3.1.2	Idealisierungen des Materialverhaltens	51
B 3.1.3	Der Mehrachsige Versuch und seine Auswertung	53
B 3.1.3.1	Der Fließort	53
B 3.1.3.2	Kinematik mehrachsiger Versuche an plastischem Material	55
B 3.1.3.3	Die Fließregel	56
B 3.1.3.4	Vergleichsformänderung(sgeschwindigkeit)	57
B 3.1.4	Anisotropes Verhalten	58
B 3.1.5	Elastisch-plastisches Verhalten	59

B 3.1.5.1	Beschreibung im Spannungsraum	59
B 3.1.5.2	Beschreibung im Dehnungsraum	59
B 3.1.6	Endochrome Theorie	60
B 3.1.7	Zyklisches Verhalten	61
B 3.1.8	Der Scherversuch	61
B 3.2	Grundgleichungen der Plastomechanik <i>Von D. Besdo und Th. Lehmann</i>	64
B 3.2.1	Materialunabhängige Gleichungen	64
B 3.2.1.1	Der Gaußsche Integralsatz und das Transporttheorem	64
B 3.2.1.2	Die Kontinuitätsgleichung oder Massenbilanz	66
B 3.2.1.3	Newtonsches Axiom oder Impulsbilanz	66
B 3.2.1.4	Drehimpulsbilanz und Boltzmannsches Axiom	68
B 3.2.1.5	Energiebilanzen	69
B 3.2.2	Deformationsmasse für die mehrachsige Umformung	70
B 3.2.2.1	Der Umformgrad und seine Erweiterungsmöglichkeiten	70
B 3.2.2.2	Herleitung allgemeiner Deformationsmaße in kartesischen Koordinaten	71
B 3.2.2.3	Herleitung in „körperfesten Koordinaten“	73
B 3.2.3	Spannungen	74
B 3.2.4	Zeitableitungen	75
B 3.2.5	Stoffgesetze	77
B 3.2.5.1	Starr/plastisches Material ohne Geschwindigkeitseinfluß	77
B 3.2.5.2	Starr/visko-plastisches Material	82
B 3.2.5.3	Elastisch-plastisches Material	82
B 3.2.6	Einige Prinzipie der numerischen Plastomechanik	84
B 3.2.6.1	Das allgemeine Prinzip der virtuellen Leistungen	84
B 3.2.6.2	Die Sätze von der oberen und der unteren Schranke	85
B 3.3	Fließspannung	87
B 3.3.1	Begriffsbestimmungen <i>Von H. Meyer-Noltemper</i>	87
B 3.3.2	Verfahren zur Aufnahme von Fließkurven	87
B 3.3.2.1	Zugversuch	87
B 3.3.2.2	Stauchversuch	89
B 3.3.2.3	Torsionsversuch (Verdrehversuch)	90
B 3.3.2.4	Spezielle Verfahren	91
B 3.3.2.5	Hinweise zur Auswahl des Verfahrens	92
B 3.3.3	Einflußgrößen <i>Von H. Wiegels</i>	93
B 3.3.3.1	Formänderung	93
B 3.3.3.2	Formänderungsgeschwindigkeit	94
B 3.3.3.3	Temperatur	94

B 3.3.3.4	Spannungszustand	95
B 3.3.3.5	Werkstoff	95
B 3.3.3.6	Mathematische Beschreibung von Fließkurven	95
B 3.3.4	Unsicherheit bei der Ermittlung und Anwendung von Fließkurven	96
B 3.3.4.1	Einfluß des Werkstoffs	96
B 3.3.4.2	Einfluß des Prüfverfahrens	96
B 3.3.4.3	Einfluß der Prüfrandbedingungen	96
B 3.3.4.4	Einfluß einer mathematischen Beschreibung der Fließkurve . .	97
B 3.3.4.5	Konsequenzen für die Ermittlung und Anwendung von Fließkurven	97
B 3.4	Formänderungsvermögen von Werkstoffen und Grenzumformgrad	98
B 3.4.1	Einleitung <i>Von E. Doege, N.L. Dung und P. Groche</i>	98
B 3.4.2	Metallkundliche Beobachtungen	98
B 3.4.2.1	Bruchphänomene	98
B 3.4.2.2	Einflußgrößen	100
B 3.4.3	Bruchkriterien	100
B 3.4.3.1	Makromechanische Bruchhypothesen	101
B 3.4.3.2	Mikromechanische Modelle der Rißbildung	104
B 3.4.4	Ermittlung des Formänderungsvermögens mit experimentell- theoretischen Methoden <i>Von R. Kopp und U. Zitz</i>	112
B 3.4.4.1	Ähnlichkeitstheoriegestützte Schrankenbetrachtung	112
B 3.4.4.2	Halbempirische Methode basierend auf FEM und Grundversuchen	113
B 3.4.5	Grenzumformgrad	116
B 3.5	Reibung <i>Von Th. Bobke, E. Doege, P. Groche und H. Luig</i>	117
B 3.5.1	Einleitung	117
B 3.5.2	Begriffsbestimmungen	118
B 3.5.3	Einfluß der Reibung bei Umformprozessen	119
B 3.5.4	Physikalische Grundlagen der Reibung	120
B 3.5.4.1	Aufbau metallischer Oberflächen	120
B 3.5.4.2	Topologie der Oberfläche	121
B 3.5.4.3	Zwischenschichten	122
B 3.5.4.4	Reib- und Verschleißmechanismen	122
B 3.5.4.5	Veränderungen der Reibpartner und ihre Auswirkungen auf die Reibung	124
B 3.5.5	Mathematische Erfassung der Reibvorgänge	125
B 3.5.5.1	Coulombsches Reibgesetz	125

B 3.5.5.2	Reibfaktormodell	126
B 3.5.5.3	Erweiterte Ansätze	126
B 3.5.6	Methoden zur experimentellen Bestimmung von für die Umformtechnik relevanten Reibwerten	127
B 3.6	Wärmeübertragung <i>Von D. Besdo, E. Doege, P. Groche und J. Marten</i>	130
B 3.6.1	Einleitung	130
B 3.6.2	Begriffsbestimmung	130
B 3.6.3	Phänomene der Wärmeübertragung	131
B 3.6.4	Mathematische Modellierung	133
B 3.6.4.1	Wärmeleitung	133
B 3.6.4.2	Konvektion	134
B 3.6.4.3	Strahlung	134
B 3.6.4.4	Wärmeübergang am gebundenen Rand	135
B 3.6.4.5	Einheitliche Formulierung des Wärmeübergangs	135
B 3.6.4.6	Reibwärme	136
B 3.6.4.7	Randbedingungen für die Wärmeleitungsrechnung	136
B 3.6.4.8	Beispielrechnung	137
B 3.6.4.9	Wärmeübergang in numerischen Simulationen	139
B 4	Lösungsverfahren der Plastomechanik	140
B 4.1	Numerik <i>Von D. Besdo und O. Mahrenholtz</i>	140
B 4.1.1	Anwendungsfälle und Modellierung	140
B 4.1.1.1	Vorbemerkungen	140
B 4.1.1.2	Technische Probleme und verfügbare numerische Verfahren	140
B 4.1.1.3	Wärmeleitung	142
B 4.1.2	Randwertprobleme und Integralgleichungen	142
B 4.1.2.1	Vorbemerkungen	142
B 4.1.2.2	Starr/plastische Medien und Markovsches Prinzip	143
B 4.1.2.3	Berücksichtigung von Reibung bei starr/plastischen Medien	144
B 4.1.2.4	Das Prinzip der virtuellen Arbeiten	145
B 4.1.3	Teilprobleme der Numerik	146
B 4.1.3.1	Integrationen und Differentiationen	146
B 4.1.3.2	Ansatzformen	148
B 4.1.3.3	Auflösung des Gleichungssystems	149
B 4.1.3.4	Eigenwert- und Verzweigungsprobleme	150
B 4.1.4	Einige grundsätzliche Lösungsmethoden	150
B 4.1.4.1	Lineare Optimierung	150
B 4.1.4.2	Differenzen- und Charakteristikenverfahren	150
B 4.1.4.3	Integralgleichungsverfahren	151
B 4.1.4.4	Kollokationsverfahren	152
B 4.1.4.5	Straffunktionen	153
B 4.1.5	Genauigkeitsprobleme	153

B 4.1.6	Konvergenzprobleme	154
B 4.1.7	Pre- und Post-Processing sowie Re-zoning	155
B 4.1.7.1	Pre-Processing	155
B 4.1.7.2	Re-Zoning	156
B 4.1.7.3	Post-Processing (Auswertung der Ergebnisse)	156
B 4.2	Ähnlichkeitstheorie in der Umformtechnik <i>Von O. Pawelski</i>	158
B 4.2.1	Aufgaben der Ähnlichkeitstheorie	158
B 4.2.2	Größenmaßstäbe	158
B 4.2.3	Methoden zur Herleitung von Modellgesetzen und Ähnlichkeitskennzahlen	159
B 4.2.3.1	Herleitung aus den grundlegenden Differentialgleichungen	159
B 4.2.3.2	Herleitung aus der Dimensionsanalyse	161
B 4.2.4	In der Umformtechnik gebräuchliche Modellgesetze und Ähnlichkeitskennzahlen	163
B 4.2.4.1	Geometrische und physikalische Ähnlichkeit	163
B 4.2.4.2	Plastostatische Ähnlichkeit	163
B 4.2.4.3	Elastostatische Ähnlichkeit	164
B 4.2.4.4	Dynamische Ähnlichkeit	165
B 4.2.4.5	Thermische Ähnlichkeit	166
B 4.2.4.6	Tribologische Ähnlichkeit	168
B 4.2.5	Anwendung der Ähnlichkeitstheorie	170
B 4.2.5.1	Übertragung von Modellversuchen auf den Betrieb	170
B 4.2.5.2	Aufstellung empirischer Prozeßgleichungen	173
B 4.3	Visioplastische Methode <i>Von R. Kopp und J. Pehle</i>	177
B 4.3.1	Einleitung	177
B 4.3.2	Verfahrensbeschreibung	177
B 4.3.2.1	Versuchstechnik und Datenaufnahme	177
B 4.3.2.2	Theoretische Auswertung	181
B 4.3.3	Anwendungsgebiete	184
B 4.3.3.1	Grundlagenuntersuchungen	184
B 4.3.3.2	Entwicklung und Verifikation theoretischer Modelle	185
B 4.3.3.3	Kopplung mit anderen Lösungsverfahren	185
B 4.3.3.4	Optimierung von Umformprozessen	186
B 4.3.4	Bewertung des Verfahrens	186
B 4.3.4.1	Genauigkeit	186
B 4.3.4.2	Aufwand	187
B 4.4	Elementare Theorie <i>Von O. Mahrenholtz und V. Mannl</i>	188
B 4.4.1	Einleitung	188
B 4.4.2	Kinematisches Modell	188

B 4.4.2.1	Streifenmodell	189
B 4.4.2.2	Röhrenmodell	190
B 4.4.2.3	Scheibenmodell	190
B 4.4.3	Das Fließgesetz	191
B 4.4.4	Statik	193
B 4.4.5	Eckenkorrekturen	197
B 4.5	Gleit- und Hauptlinienverfahren <i>Von D. Besdo</i>	200
B 4.5.1	Grundidee	200
B 4.5.2	Grundgleichungen und Minimalsystem	200
B 4.5.2.1	Materialunabhängige Gleichungen	201
B 4.5.2.2	Stoffgesetz	202
B 4.5.2.3	Minimalsystem	202
B 4.5.3	Mathematischer Charakter des Gleichungssystems	203
B 4.5.3.1	Charakteristiken: elliptische, parabolische und hyperbolische Systeme	203
B 4.5.3.2	Der Charakter des Minimalsystems	203
B 4.5.3.3	Erzeugung eines zur Untersuchung geeigneteren Systems	204
B 4.5.3.4	Die charakteristischen Richtungen des Gleichungssystems	204
B 4.5.3.5	Der mathematische Charakter des Systems	206
B 4.5.4	Lösungsverfahren mit Charakteristiken-Netzen	209
B 4.5.4.1	Massausche Gitterkonstruktion	209
B 4.5.4.2	Die Henckyschen Sätze	210
B 4.5.4.3	Der Hodograph	211
B 4.5.4.4	Häufig verwendete Lösungsanteile	211
B 4.5.4.5	Gültigkeit einer gefundenen Lösung	212
B 4.5.5	Einige typische Gleitlinienlösungen	212
B 4.5.5.1	Lösungen zum ebenen Ziehen	212
B 4.5.5.2	Einschnürung des axialsymmetrischen Zugstabs mit $k_f = \text{const}$	214
B 4.6	Schrankenmethode <i>Von P. Braun-Angott und E. Doege</i>	215
B 4.6.1	Einleitung	215
B 4.6.2	Umformleistung und Schrankenfunktionale	215
B 4.6.3	Untere Schranke	216
B 4.6.4	Obere Schranke	216
B 4.6.5	Schrankenoptimierung	217
B 4.6.6	Beispiel für den Satz von der Unteren Schranke	217
B 4.6.7	Beispiele für das obere Schrankenverfahren	218
B 4.7	Fehlerabgleichverfahren <i>Von E. Steck</i>	221

B 4.8	Finite-Elemente-Methode	227
	<i>Von D. Besdo und O. Mahrenholtz</i>	
B 4.8.1	Grundidee	227
B 4.8.1.1	Elemente, Knotenpunkte, Knotenvariable und Ansatzfunktionen	227
B 4.8.1.2	Einige Elementformen für stetige Ansätze	228
B 4.8.1.3	Einige Elementformen für stetig differenzierbare Ansätze . . .	231
B 4.8.1.4	Isoparametrische Elemente	232
B 4.8.2	Finite Elemente in der Elastizitätstheorie	233
B 4.8.3	Finite-Elemente-Verfahren für starr/plastisches Material	234
B 4.8.3.1	Aufbereitung des Markov-Prinzips	234
B 4.8.3.2	Iterationsmethode	235
B 4.8.3.3	Probleme der Methode	235
B 4.8.3.4	Anwendungen	236
B 4.8.4	Finite-Elemente-Verfahren für elastisch-plastische Medien . . .	236
B 4.8.4.1	Vorbemerkungen	236
B 4.8.4.2	Gemeinsamkeiten der Programmierung	236
B 4.8.4.3	Besonderheiten bei der Spannungsraumformulierung	239
B 4.8.4.4	Besonderheiten bei der Dehnungsraumformulierung	239
B 4.8.4.5	Beispiele	240
B 4.9	Finite-Differenzen-Methode	241
	<i>Von P. Braun-Angott</i>	
B 4.9.1	Parabolische Differentialgleichungen	241
B 4.9.1.1	Formulierung eines Rand- und Anfangswertproblems	241
B 4.9.1.2	Diskretisierung der Ortsableitungen	243
B 4.9.1.3	Zeitdiskretisation	245
B 4.9.1.4	Explizites Differenzenverfahren	246
B 4.9.1.5	Implizite Verfahren	247
B 4.9.2	Elliptische Differentialgleichungen	250
B 4.9.2.1	Stationäre Temperaturfelder in einer rotierenden Walze	250
B 4.9.2.2	Differenzengleichungen	251
B 4.10	Randelemente-Methode	253
	<i>Von G. Kuhn und O. Mahrenholtz</i>	
B 4.10.1	Einführung	253
B 4.10.1.1	Allgemeine Vorbemerkung	253
B 4.10.1.2	Augenscheinliche Unterschiede zu den anderen Verfahren . . .	254
B 4.10.2	Stationäre Wärmeleitung	256
B 4.10.2.1	Übergang zur Randintegralformulierung	256
B 4.10.2.2	Numerisches Lösungsverfahren	258
B 4.10.3	Thermoelastizität	260
B 4.10.3.1	Randintegralformulierung	260
B 4.10.3.2	Numerisches Lösungsverfahren	262
B 4.10.4	Elastoplastizität	263

Teil C	Grundlagen der Werkstoffkunde	265
C 1	Einführung	267
	<i>Von W. Dahl</i>	
C 2	Stahl	269
C 2.1	Gefüge der Stähle	269
	<i>Von H. P. Hougardy</i>	
C 2.1.1	Definition des Gefüges	269
C 2.1.1.1	Kennzeichnende Parameter	269
C 2.1.1.2	Quantitative Beschreibung	270
C 2.1.1.3	Zusammenhang zwischen Gefügeparameter und mechanischen Eigenschaften	270
C 2.1.2	Das Zustandsschaubild Eisen-Zementit	271
C 2.1.3	Nichtmetallische Einschlüsse	273
C 2.1.4	Durch Umwandlung entstehende Gefüge	273
C 2.1.4.1	Austenit	273
C 2.1.4.2	Ferrit	273
C 2.1.4.3	Karbid	274
C 2.1.4.4	Perlit	274
C 2.1.4.5	Martensit	275
C 2.1.4.6	Bainit	276
C 2.1.5	Gefüge nach Anlassen	277
C 2.1.5.1	Angelassener Martensit	277
C 2.1.5.2	Angelassener Bainit	278
C 2.1.5.3	Aushärtung	278
C 2.1.6	Einfluß einer Wärmebehandlung auf das Gefüge	278
C 2.1.6.1	Austenitisieren	279
C 2.1.6.2	Umwandeln	281
C 2.1.7	Einfluß einer Umformung auf das Gefüge	283
C 2.2	Mechanische Eigenschaften	286
	<i>Von W. Dahl und K. E. Hagedorn</i>	
C 2.2.1	Verhalten bei einsinniger Beanspruchung und bei Temperaturen um und unter Raumtemperatur	286
C 2.2.1.1	Fließverhalten	286
C 2.2.1.2	Zähigkeit und Bruchverhalten	317
C 2.2.2	Verhalten bei wechselnder Beanspruchungsrichtung und bei Temperaturen um und unter Raumtemperatur	340
C 2.2.2.1	Einmaliger Wechsel der Beanspruchungsrichtung (Bauschinger-Effekt)	340
C 2.2.2.2	Verhalten bei schwingender Beanspruchung (Ermüdung)	343
C 2.2.3	Verhalten bei höheren Temperaturen	343
C 2.2.3.1	Verhalten bei leicht erhöhten Temperaturen	344

C 2.2.3.2	Verhalten bei der Warmumformung	345
C 2.2.3.3	Zeitstandverhalten (Kriechen)	349
C 3	Nichteisenmetalle	353
	<i>Von W. Blum, H. Mughrabi und B. Reppich</i>	
C 3.1	Gefüge	353
C 3.1.1	Einleitung	353
C 3.1.2	Gefügeelemente und Kenngrößen	354
C 3.2	Mechanische Eigenschaften	357
C 3.2.1	Gefüge und Festigkeit	357
C 3.2.1.1	Grenzen und Möglichkeiten der Festigkeitssteigerung	357
C 3.2.1.2	Härtungsmechanismen	360
C 3.2.1.3	Kombination von Einzelmechanismen	376
C 3.2.2	Systematik mechanischer Messungen	379
C 3.2.3	Grundlagen der Kristallplastizität, Verformungsmechanismen	381
C 3.2.3.1	Grundbegriffe	381
C 3.2.3.2	Verformung bei tiefen Temperaturen, einfache Modelle der Verfestigung	383
C 3.2.3.3	Verformungsmechanismen bei hohen Temperaturen	390
C 3.2.3.4	Verformungsmechanismus-Karten	392
C 3.2.3.5	Versetzungsanordnungen in verformten einphasigen metallischen Werkstoffen	394
C 3.2.4	Kenngrößen der plastischen Verformung	399
C 3.2.4.1	Versuche unter konstanter Beanspruchung	400
C 3.2.4.2	Versuche mit Wechseln der Beanspruchung	408
C 3.2.5	Rekristallisation	411
C 3.2.5.1	Statische Rekristallisation	412
C 3.2.5.2	Dynamische Rekristallisation	417
C 3.2.6	Superplastizität	423
C 3.2.6.1	Definition und Kennzeichen	423
C 3.2.6.2	Phänomenologische Modellierung der Superplastizität	426
C 3.2.6.3	Mikrostrukturelle Modelle der Superplastizität	429
C 3.2.6.4	Technische Anwendung	431
C 3.2.7	Versagen durch Bruch	433
C 3.2.7.1	Spaltbruch	434
C 3.2.7.2	Duktiler Bruch durch plastisches Hohlraumwachstum	436
C 3.2.7.3	Interkristalliner Kriechbruch	438
C 3.2.7.4	Bruch durch plastische Instabilität: Reißen	439
C 3.2.7.5	Bruchmechanismuskarten	440

Teil D	Anwendung der Grundlagen auf Umformverfahren . . .	441
D 1	Einführung	443
	<i>Von R. Kopp</i>	
D 2	Warmumformung	446
D 2.1	Walzen	446
D 2.1.1	Übersicht	446
	<i>Von R. Kopp und M. Hoppe</i>	
D 2.1.1.1	Verfahrensbeschreibung	446
D 2.1.1.2	Zielgrößen und deren Ermittlung	450
D 2.1.2	Warmband aus hochfestem mikrolegiertem Stahl	456
	<i>Von L. Meyer, I. v. Hagen und K. Frommann</i>	
D 2.1.2.1	Ausgangsgefüge, Ausgangszustand	457
D 2.1.2.2	Erwärmung	462
D 2.1.2.3	Formänderungsvermögen und Fließspannung	466
D 2.1.2.4	Thermomechanisches Walzen	468
D 2.1.2.5	Anisotropie und Textur	474
D 2.1.2.6	Einfluß des Endgefüges auf die Verarbeitungs- und Gebrauchseigenschaften	478
D 2.1.3	Band aus NE-Metallen am Beispiel Aluminium und Kupfer . .	482
D 2.1.3.1	Einfluß der Vormaterialqualität und -behandlung auf die Umformbarkeit von Aluminiumband	482
	<i>Von B. Grzemba und J. Hasenclever</i>	
D 2.1.3.2	Gefüge im Al-Warmband	483
D 2.1.3.3	Einfluß der Gefügezusammensetzung auf den Fertigungsprozeß von Kupferband	488
	<i>Von W. Dürschnabel</i>	
D 2.1.3.4	Einfluß des Fertigungsprozesses auf die Gebrauchseigenschaften von Cu-Band	490
D 2.1.4	Nahtloses Rohr aus Stahl	492
	<i>Von I. v. Hagen und R. Kümmerling</i>	
D 2.1.4.1	Einfluß der Erwärmung auf die Werkstoffeigenschaften	494
D 2.1.4.2	Formänderungsvermögen beim Schrägwalzen	495
D 2.1.4.3	Walzen in der Kontistaffel und Fragen des Werkstoffeinflusses	500
D 2.1.4.4	Thermomechanisches Walzen in der Endstufe von Kontiwalzwerken	501
D 2.1.5	Profile aus Stahl	504
D 2.1.5.1	Thermomechanische Behandlung (TMB) beim Profilwalzen . .	504
	<i>Von I. Doltsinis, R. Kopp und M.M. de Souza</i>	

D 2.1.5.2	Stofffluß und Kaliberverschleiß bei kompliziert irregulären Kalibrierungen	534
	<i>Von H.-P. Kallabis</i>	
D 2.1.6	Draht aus Stahl	541
	<i>Von K. Frommann und E. Kast</i>	
D 2.1.6.1	Einfluß der Stahlerzeugung und der Sekundärmetallurgie	542
D 2.1.6.2	Einfluß des Gießverfahrens auf die Qualität	542
D 2.1.6.3	Einfluß der Erwärmung auf die Qualität	548
D 2.1.6.4	Einfluß der Umformung auf die Qualität	549
D 2.1.6.5	Wärmebehandlung aus der Walzhitze	560
D 2.1.6.6	Werkstoffkundliche Betrachtung bei der kontrollierten Umformung und Abkühlung	567
D 2.1.7	NE-Metall-Halbzeug in Walzdrahtabmessungen	574
	<i>Von P. Funke und M. Eckhardt</i>	
D 2.1.7.1	Einfluß umformtechnischer, werkstoffspezifischer und wirtschaftlicher Gesichtspunkte auf die Wahl des Herstellungsverfahrens	574
D 2.1.7.2	Beeinflussung des Werkstoffzustands durch die unterschiedlichen Herstellungsbedingungen bei Drähten	583
D 2.2	Schmieden	586
D 2.2.1	Übersicht	586
	<i>Von R. Kopp und U. Zitz</i>	
D 2.2.1.1	Verfahrensbeschreibung	586
D 2.2.1.2	Zielgrößen und deren Ermittlung	591
D 2.2.2	Axialsymmetrische, einfache Schmiedeteile	596
D 2.2.2.1	Dynamische Rekristallisation	596
	<i>Von R. Kopp und K. Karhausen</i>	
D 2.2.2.2	Rißentstehung und Formänderungsvermögen	600
	<i>Von R. Kopp und U. Zitz</i>	
D 2.2.2.3	Reibungseinfluß auf Stofffluß und Eigenschaften eines gestauchten Zylinders	602
	<i>Von O. Mahrenholtz</i>	
D 2.2.2.4	Thermomechanisches Materialverhalten und thermische Werkzeugbelastung	607
D 2.2.2.5	Einfluß von Fließspannungsschwankungen auf die Maßhaltigkeit	613
	<i>Von E. Doege</i>	
D 2.2.3	Turbinenscheibe	620
	<i>Von O. Mahrenholtz</i>	
D 2.2.3.1	Temperaturverlauf und Stofffluß im Werkstück	620

D 2.2.3.2	Wechselwirkung Werkstück/Werkzeug unter Berücksichtigung der Werkzeugeigenschaften	624
D 2.2.4	Turbinenschaufel/Verdichterschaufel	631
D 2.2.4.1	Reibungseinfluß auf zweidimensionalen Stofffluß und Umformkräfte	631
D 2.2.4.2	Thermomechanische Kopplung bei zwei- und dreidimensionalem Stofffluß <i>Von I. St. Doltsinis</i>	638
D 2.2.5	Freiformgeschmiedete Welle aus Stahl <i>Von R. Kopp, W. Ji, A. Holl und U. Zitz</i>	647
D 2.2.5.1	Beseitigung der gießtechnisch bedingten Fehler	648
D 2.2.5.2	Verhinderung der umformtechnisch bedingten Fehler	658
D 2.2.6	Heißisostatisch gepreßte Teile <i>Von H.-D. Steffens, J. Lebküchner-Neugebauer und B. Wielage</i>	671
D 2.2.6.1	Verdichtungsvorgänge sowie Umformprozesse des heißisostatischen Pressens	673
D 2.2.6.2	Nachverdichten durch HIP	
D 2.3	Strangpressen (auch Halbwarmstrangpressen)	688
D 2.3.1	Übersicht <i>Von R. Akeret</i>	688
D 2.3.1.1	Verfahrensbeschreibung	688
D 2.3.1.2	Zielgrößen und deren Ermittlung	691
D 2.3.2	Profile aus leicht preßbaren Aluminiumlegierungen <i>Von G. Scharf</i>	702
D 2.3.2.1	Eigenschaften, Anforderungen und Anwendung der Legierungen AlMgSi0,5 bis 0,7	702
D 2.3.2.2	Einfluß von Qualität und Homogenität der Strangußbarren auf den Preßprozeß	703
D 2.3.2.3	Blockanwärmung und Umformung	705
D 2.3.2.4	Temperaturverlauf und Temperaturgrenzen	706
D 2.3.2.5	Richten und Auslagern der Profile	707
D 2.3.3	Profile aus schwer preßbaren Aluminiumlegierungen	707
D 2.3.3.1	Eigenschaften, Anforderungen und Anwendung der Legierung AlZnMgCu1,5	707
D 2.3.3.2	Werkstoffeigenschaften der Strangußbarren und deren Auswirkungen auf den Preßprozeß	708
D 2.3.3.3	Blockanwärmung und Umformung	710
D 2.3.3.4	Richten und Auslagern der Profile	711
D 2.3.4	Messingstangen <i>Von M. Bauser</i>	712
D 2.3.4.1	Eigenschaften und Anwendung von Zerspanungsmessing	715

D 2.3.4.2	Stofffluß und Strangfehler beim direkten und indirekten Strangpressen	716
D 2.3.5	Kupferrohre	717
D 2.3.5.1	Eigenschaften und Anwendung	719
D 2.3.5.2	Stofffluß und Preßfehler	719
D 2.3.6	Rohre aus Edelstählen und Nickelbasislegierungen <i>Von H. Richter</i>	721
D 2.3.6.1	Werkstoffe und Ausgangsmaterial	721
D 2.3.6.2	Einfluß des Gefügestands der Strangpreßblöcke auf den Preßprozeß und die Produkteigenschaften	725
D 2.3.6.3	Umformung und Weiterbehandlung	726
D 2.4	Superplastisches Umformen <i>Von G. Frommeyer</i>	729
D 2.4.1	Übersicht	729
D 2.4.1.1	Verfahrensbeschreibung	729
D 2.4.1.2	Zielgrößen und deren Ermittlung	730
D 2.4.2	Bauteile aus Eisen-Kohlenstoff-Legierungen	734
D 2.4.2.1	Superplastizität unlegierter Stähle mit niedrigen Kohlenstoffgehalten	734
D 2.4.2.2	Superplastizität hochkohlenstoffhaltiger Stähle	734
D 2.4.2.3	Superplastizität hochlegierter Werkzeugstähle	738
D 2.4.2.4	Superplastizität rasch erstarrter untereutektischer, eutektischer und übereutektischer Eisenkohlenstoff-Basislegierungen	739
D 2.4.2.5	Superplastizität hochlegierter Dualphasenstähle	741
D 2.4.2.6	Superplastische Präzisionsumformung	743
D 2.4.3	Bauteile aus hochfesten Luftfahrtwerkstoffen <i>Von P. J. Winkler</i>	745
D 2.4.3.1	Superplastizität hochfester Al-Legierungen	747
D 2.4.3.2	Superplastizität hochfester Titanlegierungen	750
D 3	Kaltumformung	755
D 3.1	Walzen <i>Von B. Engl und K. Frommann</i>	755
D 3.1.1	Übersicht	755
D 3.1.1.1	Verfahrensbeschreibung	755
D 3.1.1.2	Zielgrößen und deren Ermittlung	763
D 3.1.2	Geglühtes Feinblech aus Stahl	764
D 3.1.2.1	Änderungen der Eigenschaften beim Durchlaufglühen	764
D 3.1.2.2	Änderungen der Eigenschaften durch Dressieren	771
D 3.1.3	Band aus Aluminium <i>Von B. Grzemba und J. Hasenclever</i>	772
D 3.1.3.1	Festigkeit und Gefüge	772

D 3.1.3.2	Walztextur in einer Folie aus Reinstaluminium	774
D 3.1.3.3	Einstellung der Festigkeit bei Verpackungsband aus AlMn1Cu	775
D 3.1.4	Walzplattiertes Blech <i>Von D. Junkers, H.-R. Priebe und H.-G. Steinmann</i>	776
D 3.1.4.1	Bindemechanismus	776
D 3.1.4.2	Einflußfaktoren auf den Bindungsvorgang	779
D 3.1.4.3	Praktische Anwendung des Kaltwalzplattierens	783
D 3.1.5	Kaltgepilgerte Brennstabhüllrohre aus Zirkoniumwerkstoffen . . <i>Von H. Jung und K.-H. Matucha</i>	785
D 3.1.5.1	Einfluß der Ausgangswerkstoffeigenschaften auf die Herstellung	788
D 3.1.5.2	Einfluß des Q-Werts auf die Herstellung und die mechanischen Eigenschaften	789
D 3.2	Durchziehen	792
D 3.2.1	Übersicht <i>Von F. Dohmann, R. Kopp und J. Mittendorff</i>	792
D 3.2.1.1	Verfahrensbeschreibung	792
D 3.2.1.2	Zielgrößen und deren Ermittlung	794
D 3.2.2	Kaltgezogene Stangen und Drähte <i>Von E. Aernoudt</i>	798
D 3.2.2.1	Fließkurven und Strukturentwicklung bei einphasigen Werkstoffen	798
D 3.2.2.2	Fließkurven und Strukturen bei mehrphasigen Werkstoffen . . .	805
D 3.2.2.3	Alterung, Festigkeit und Ziehbarkeit von Stahldraht	810
D 3.2.2.4	Bestimmung von Eigenspannungen mit Hilfe der FEM <i>Von A. Tekkaya und J. Gerhard</i>	812
D 3.2.3	Halbwarmgezogener Draht <i>Von R. Kopp, K. D. Maraite und M. Hoppe</i>	819
D 3.2.3.1	Anstrengungsgrad	820
D 3.2.3.2	Werkzeugverschleiß	823
D 3.2.4	Längsverrippte Rohre <i>Von F. Dohmann</i>	828
D 3.2.4.1	Verfahrensgrenzen	828
D 3.2.4.2	Kritische Bereiche im Werkstoff	829
D 3.2.5	Stahlkord <i>Von W. V. Raemdonck</i>	836
D 3.2.5.1	Einfluß des Walzdrahts auf die Qualität des Stahlkordfilaments	837
D 3.2.5.2	Einfluß der Prozeßparameter auf die Qualität des Stahlkordfilaments	838

D 3.3	Richten	841
	<i>Von R. Fangmeier und Kh. Kutzenberger</i>	
D 3.3.1	Übersicht	841
D 3.3.1.1	Verfahrensbeschreibung	841
D 3.3.1.2	Zielgrößen und deren Ermittlung	841
D 3.3.2	Runde Stäbe	842
D 3.3.2.1	Kaltverfestigung, Bauschinger-Effekt	843
D 3.3.2.2	Einfluß einer Oberflächenhärtung auf den Richtprozeß	844
D 3.3.2.3	Eigenspannungen und Maßänderungen	845
D 3.3.3	Rohre	847
D 3.3.3.1	Bauschinger-Effekt	848
D 3.3.3.2	Eigenspannungen	849
D 3.3.3.3	Maßänderungen	850
D 3.4	Biegen	851
	<i>Von E. v. Finckenstein</i>	
D 3.4.1	Übersicht	851
D 3.4.1.1	Verfahrensbeschreibung	851
D 3.4.1.2	Zielgrößen und deren Ermittlung	854
D 3.4.2	Gesenkgebogenes Blech	856
D 3.4.2.1	Spannungen, Formänderung und Rückfederung beim CNC-Gesenkbiegen	856
D 3.4.2.2	Ermittlung des Spannungs- und Formänderungszustands mittels Visioplasticity und FEM	859
D 3.4.2.3	Verbesserung der Form- und Maßgenauigkeit	861
D 3.4.2.4	Vermeidung von Oberflächenbeschädigungen	864
D 3.4.2.5	Verbesserung der Kaltumformbarkeit	865
D 3.5	Fließpressen	867
D 3.5.1	Übersicht	867
	<i>Von D. Schmoeckel, H. Dorth und W. Röder</i>	
D 3.5.1.1	Verfahrensbeschreibung	869
D 3.5.1.2	Zielgrößen und deren Ermittlung	870
D 3.5.2	Antriebswelle	871
D 3.5.2.1	Fertigungsprozeß und Bauteileigenschaften	871
D 3.5.3	Fahrradgetriebering	877
D 3.5.3.1	Fertigungsprozeß und Bauteileigenschaften	877
D 3.5.4	Zerspannte Fließpreßteile	879
	<i>Von W. König und M. Goldstein</i>	
D 3.5.4.1	Ausgangsbedingungen für die spanende Bearbeitung	879
D 3.5.4.2	Zerspanbarkeit	881

D 3.6	Tiefziehen-Streckziehen	889
	<i>Von E. Doege, P. Groche und M. Huck</i>	
D 3.6.1	Übersicht	889
D 3.6.1.1	Verfahrensbeschreibung	889
D 3.6.1.2	Zielgrößen und deren Ermittlung	893
D 3.6.2	Rotationssymmetrischer Napf	898
D 3.6.2.1	Bodenreißer	898
D 3.6.2.2	Einfluß der Anisotropie auf den Tiefziehprozeß	900
D 3.7	Hochgeschwindigkeitsumformung	906
	<i>Von E. El-Magd, W. Scheideler und G. Glomski</i>	
D 3.7.1	Übersicht	906
D 3.7.1.1	Verfahrensbeschreibung	906
D 3.7.1.2	Zielgrößen und deren Ermittlung	907
D 3.7.2	Magnetumgeformte Rohre und Bleche	915
D 3.7.2.1	Magnetischer Druck	917
D 3.7.2.2	Optimale Nutzung von Magnetumformanlagen	920
D 3.8	Verfahren zur Oberflächenver-/umformung	922
D 3.8.1	Übersicht	922
	<i>Von K. H. Kloos, R. Kopp, H. Wohlfahrt und O. Vöhringer</i>	
D 3.8.1.1	Verfahrensbeschreibung	922
D 3.8.1.2	Zielgrößen und deren Ermittlung	924
D 3.8.2	Festgewalzte glatte und gekerbte Wellen	927
	<i>Von K. H. Kloos</i>	
D 3.8.2.1	Eigenschaftsänderungen beim Festwalzen	927
D 3.8.2.2	Ermüdungsverhalten festgewalzter Teile	928
D 3.8.3	Kaltgewalzte Gewinde	931
D 3.8.3.1	Festigkeitsverhalten gewalzter Gewinde	933
D 3.8.4	Verfestigungsgestrahlte glatte und gekerbte Flachproben	935
	<i>Von O. Vöhringer und H. Wohlfahrt</i>	
D 3.8.4.1	Veränderungen des Oberflächenzustands	935
D 3.8.4.2	Auswirkungen auf die Schwingfestigkeit	937
D 3.8.5	Verfestigungsgestrahlte Zahnräder	940
	<i>Von H. Wohlfahrt und O. Vöhringer</i>	
D 3.8.5.1	Veränderungen des Oberflächenzustands	940
D 3.8.5.2	Auswirkungen auf die Schwingfestigkeit	944
D 3.8.6	Kugelstrahlumgeformtes Integralbauteil	946
	<i>Von R. Kopp und F. Wüstefeld</i>	
D 3.8.6.1	Plastifizierung einer Platte beim Eindringen einer Kugel	948
D 3.8.6.2	Bauteilkrümmung und mechanische Eigenschaften	951
	Literaturverzeichnis	955
	Sachverzeichnis	1009