



H. Lippmann

Mechanik des Plastischen Fließens

Grundlagen und technische Anwendungen

Mit 129 Abbildungen

Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York 1981

Dr. rer. nat. HORST LIPPMANN

o. Professor am Lehrstuhl A für Mechanik
und Leiter des Staatlichen Materialprüfamtes für
den Maschinenbau der Technischen Universität München
Arcisstraße 21, D-8000 München 2

CIP-Kurztitelaufnahme der Deutschen Bibliothek

Lippmann, Horst:

Mechanik des Plastischen Fließens.

Grundlagen u. techn. Anwendungen / Horst Lippmann.

Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 1981

ISBN 978-3-642-52210-9 ISBN 978-3-642-52209-3 (eBook)

DOI 10.1007/978-3-642-52209-3

Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der Funksendung, der Wiedergabe auf photomechanischem oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten.

Bei Vervielfältigungen für gewerbliche Zwecke ist gemäß § 54 UrhG eine Vergütung an den Verlag zu zahlen, deren Höhe mit dem Verlag zu vereinbaren ist.

© Springer-Verlag Berlin, Heidelberg 1981

Softcover reprint of the hardcover 1st edition 1981

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Buche berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zur Annahme, daß solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

2163/3020—543210

Vorwort

Nachdem im Jahre 1967 der gemeinsam mit *O. Mahrenholtz* verfaßte 1. Band einer „Plastomechanik der Umformung metallischer Werkstoffe“ erschienen war, führte der berufliche Werdegang beide Autoren an verschiedene Orte. Ich selbst zog im Anschluß an meine hannoversche Tätigkeit von Braunschweig über Karlsruhe nach München um. Es war die Zeit der Studentenunruhen, der Hochschulreformen, der anwachsenden Gremien- und Verwaltungsaktivitäten. Manche wissenschaftliche Arbeit blieb auf der Strecke.

So auch erging es dem geplanten 2. Band der „Plastomechanik“. Als ich mich ihm vor einigen Jahren wieder intensiver widmen konnte, stellte es sich als sinnvoll heraus, jetzt ein unabhängiges, in sich geschlossenes Buch über Plastizitätstheorie und ihre Anwendungen zu schreiben. Es enthält zwar den ursprünglich für den 2. Band geplanten Stoff, aber auch Teile von Band 1 sowie Abschnitte, die deutlich über umformtechnische Probleme hinausgehend Fragen der Tragfähigkeit von Strukturen, der Boden- und der Felsmechanik behandeln. Einiges ist bislang unveröffentlicht. An das ursprünglich zweibändige Konzept erinnern im wesentlichen noch einige Fußnoten mit Berichtigungen zu „Band 1“; entsprechende Hinweise stammen u. a. von meinen Kollegen *F. Hecker* (Braunschweig) und *A. Troost* (Aachen).

Dem Springer-Verlag zolle ich Respekt für seine immerwährende Geduld sowie Dank für die dennoch hervorragende Zusammenarbeit und die gute Ausstattung des Werkes trotz gestiegener Kosten. Leider mußte das alphabetische Namens- und Autorenregister zugunsten eines (noch) endlichen Preises dem Rotstift zum Opfer fallen.

Bei der Abfassung des Manuskriptes unterstützten mich zahlreiche Mitarbeiter, Freunde und Kollegen direkt oder indirekt durch Rat und Kritik, unter ihnen insbesondere Herr Obering. Dr.-Ing. *V. Mannl* (München). Es seien auch die stets anregenden Diskussionen im Arbeitskreis „Grundlagen der bildsamen Formgebung“ des Vereins deutscher Eisenhüttenleute sowie im Arbeitskreis „Wissenschaftliche Grundlagen“ des Steinkohlenbergbauvereins erwähnt. Den Herren Dipl.-Ing. *M. Kirchner* und Dipl.-Ing. *W. Winter* (München) danke ich für das Mitlesen der Korrekturen.

München, Oktober 1980

H. Lippmann

Inhaltsverzeichnis

Einleitung	1
1 Stab, Stabwerk und Kontinuum	5
1.1 Plastostatik des Einzelstabes	5
1.2 Stabwerke	13
1.2.1 Grundbegriffe	13
1.2.2 Fließort, Fließbedingung	18
1.2.3 Konvexität	26
1.2.4 Fließregel und Fließgesetz	29
1.2.5 Extremalsätze	35
1.3 Das plastische Kontinuum	37
1.3.1 Grundlagen	37
1.3.2 Allgemeines Fließgesetz	41
1.3.3 Extremalsätze	47
1.3.4 Spezielle Fließgesetze für isotropes, inkompressibles Material	49
1.3.4.1 Hauptzustandsraum	49
1.3.4.2 Fließgesetz nach Tresca	53
1.3.4.3 Fließgesetz nach Lévy-Huber- v. Mises	55
1.3.4.4 Ebenes Fließen	56
1.3.5 Anisotrope Fließgesetze nach v. Mises-Hill und Sawczuk-Ivlev	58
1.3.6 Fließgesetz nach Coulomb-Mohr für isotropes, kompressibles Material und Verallgemeinerungen	68
2 Einige geschlossene Lösungen und deren Erweiterungen	74
2.1 Zug-, Druck- und Torsionsbeanspruchung gerader Stäbe mit Voll- und Hohlquerschnitten	74
2.1.1 Torsion von Rundstäben und Kreiszyllindern	74
2.1.2 Längenänderung bei der Torsion anisotroper Stäbe	78
2.1.3 Isotropes Rohr unter kombinierter Beanspruchung	79
2.1.4 Torsion von Stäben mit beliebigen Vollquerschnitten	82

2.2	Biegen	89
2.2.1	Einführung	89
2.2.2	Blechbiegen (ebenes Fließen)	91
2.2.3	Rückfederung und Restspannungen	99
2.2.4	Hochkantbiegen (ebener Spannungszustand)	103
2.2.5	Ergänzungen	107
2.3	Axialsymmetrische Umformung von Blech und dünnwandigen Hohlprofilen	109
2.3.1	Tiefziehen	109
2.3.2	Ziehen durch konische Matrizen	117
2.3.3	Streckziehen	122
2.3.4	Hydrostatisches Abstrecken	128
2.3.5	Membran unter Stoßbelastung	131
2.4	Rotationssymmetrisches ebenes Fließen eines körnigen Materials	135
3	Elementare Plastizitätstheorie	143
3.1	Stauchen und Schmieden	143
3.2	Ziehen von Draht und metallischen Rundstäben	151
3.3	Walzen von Blech	156
3.4	Gebirgsschlag	161
4	Schrankenverfahren und verwandte Methoden	168
4.1	Trennvorgänge in Metallen	168
4.1.1	Lochen, Stanzen und Schneiden; Traglast einer Platte auf gelochtem Fundament	168
4.1.2	Spanen	175
4.2	Zug- und Druckumformung von Metallen	182
4.2.1	Strang- und Fließpressen mit rechtwinkligem Block-Aufnehmer	182
4.2.2	Ziehen und Pressen durch Düsen	190
4.2.3	Stauchen und Schmieden	194
4.3	Traglastprobleme bei körnigem Material	198
4.3.1	Rechteckfundament auf „gewichtlosem“ Untergrund	198
4.3.2	Abstützung eines bergmännischen Hohlraumes	201
4.4	Numerische Methoden	204
5	Charakteristikenverfahren	210
5.1	Plastokinetik des Einzelstabes	210
5.1.1	Grundlagen	210
5.1.2	Geschwindigkeitsunabhängiger Werkstoff	216
5.1.2.1	Charakteristische Gleichungen	216
5.1.2.2	Charakteristiken und Wellen	217
5.1.2.3	Schockfronten	219
5.1.2.4	„Bilineares“ Material	221

5.1.3 Anwendungen	223
5.1.3.1 Belastung und Entlastung des halb-unendlichen Stabes	223
5.1.3.2 Hochgeschwindigkeitsschmieden	224
5.2 Ebenes Fließen	229
5.2.1 Grundlagen	229
5.2.2 Gleitlinientheorie für inkompressibles Material	232
5.2.2.1 Charakteristische Gleichungen des Spannungszustandes	232
5.2.2.2 Charakteristische Gleichungen des Geschwindigkeitszustandes	236
5.2.2.3 Gleitliniennetze in der Fließ-, Spannungs- und Hodographenebene	238
5.2.2.4 Unstetigkeiten und starre Zonen	245
5.2.3 Anwendungen	250
5.2.3.1 Strangpressen mit $\frac{2}{3}$ -Reduktion	250
5.2.3.2 Strangpressen mit beliebiger Reduktion	258
5.2.3.3 Eindringen eines Starrkörpers in den plastischen Halbraum	263
5.2.3.4 Weitere Beispiele	265
5.2.4 Isotropes granulares, kompressibles Material	268
5.3 Axialsymmetrisches Fließen	271
5.3.1 Grundlagen	271
5.3.2 Zwei Sonderfälle	273
5.3.3 Gleitlinientheorie	275
5.3.3.1 Allgemein	275
5.3.3.2 Anwendung: Drahtziehen	276
5.3.4 Hauptlinientheorie	280
5.3.4.1 Allgemein	280
5.3.4.2 Weitere Sonderfälle und Anwendungen	285
5.4 Ergänzungen	289
Anhang	291
A.1 Erinnerung an die Matrizenalgebra	291
A.1.1 Matrizen und Determinanten	291
A.1.2 Lineare Gleichungssysteme	294
A.2 Grundbegriffe der stoffunabhängigen Kontinuumsmechanik	296
A.2.1 Spannungen, Formänderungen, Formänderungsleistung	296
A.2.2 Gleichgewicht und Verträglichkeit	301
A.2.3 Koordinatendrehung	305
A.3 Systeme linearer partieller Differentialgleichungen	308
A.3.1 Problemstellung	308
A.3.2 Charakteristiken	309
A.3.3 Massausche Gitterkonstruktion	312
A.3.3.1 Allgemein	312
A.3.3.2 Erstes Anfangswertproblem	314
A.3.3.3 Zweites Anfangswertproblem	317

A.3.3.4	Drittes Anfangswertproblem	317
A.3.3.5	Umkehrproblem	317
A.3.3.6	Spezialfall $n = 2$	319
A.3.4	Ergänzungen	319
Literatur	321
Sachverzeichnis	345