



Jörg Laumann · Markus Feldmann  
Jörg Frickel · Manuel Krahwinkel  
Matthias Kraus · Natalie Stranghöner  
Thomas Ummenhofer

# Petersen Stahlbau

Grundlagen der Berechnung und  
baulichen Ausbildung von Stahlbauten

*5. Auflage*

**EBOOK INSIDE**

 Springer Vieweg

Petersen Stahlbau

Jörg Laumann · Markus Feldmann · Jörg Frickel ·  
Manuel Krahwinkel · Matthias Kraus ·  
Natalie Stranghöner · Thomas Ummenhofer

# Petersen Stahlbau

Grundlagen der Berechnung und baulichen Ausbildung  
von Stahlbauten

5., aktualisierte Auflage

Jörg Laumann  
FH Aachen  
Institut IBB  
Aachen, Deutschland

Markus Feldmann  
Institut für Stahlbau  
RWTH Aachen  
Aachen, Deutschland

Jörg Frickel  
Büro Meyer Schubart  
Wunstorf, Deutschland

Manuel Krahwinkel  
HafenCity Universität Hamburg Leiter  
Labor für Technische Mechanik  
Hamburg, Deutschland

Matthias Kraus  
Fakultät Bauingenieurwesen  
Bauhaus Universität Weimar  
Weimar, Deutschland

Natalie Stranghöner  
Universität Duisburg-Essen  
Essen, Deutschland

Thomas Ummenhofer  
Karlsruher Institut für Technologie  
Universität Karlsruhe  
Karlsruhe, Deutschland

Christian Petersen  
Ottobrunn, Bayern, Deutschland

ISBN 978-3-658-20509-6      ISBN 978-3-658-20510-2 (eBook)  
<https://doi.org/10.1007/978-3-658-20510-2>

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

© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, ein Teil von Springer Nature 1988, 1990, 1993, 2013, 2022  
Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag, noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen.

Lektorat: Dipl.-Ing. Ralf Harms

Springer Vieweg ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Abraham-Lincoln-Str. 46, 65189 Wiesbaden, Germany

# Vorwort

---

Nach ca. 8 Jahren erscheint das renommierte Standardwerk von Herrn Professor Petersen in einer neu überarbeiteten Auflage. Diese wurde auf Basis der vierten Auflage durch ein Team von Autoren in wesentlichen Zügen neu bearbeitet. Dabei wurden aktuelle Normungen aber auch neue wissenschaftliche Erkenntnisse eingebracht. Bildunterschriften und Tabellenüberschriften wurden anders als in früheren Auflagen ergänzt, um eine leichtere Handhabung zu gewährleisten. Der über Jahrzehnte bekannte Stil des Werkes wurde hierbei in wesentlichen Zügen beibehalten.

Als wesentliche Neuerung sind die Anpassungen auf die neue Eurocode-Normengeneration mit den jeweiligen nationalen Anwendungsdokumenten zu sehen, die Ende 2010 erschienen und 2012 bauaufsichtlich eingeführt wurden. Auch aktuelle Normenauslegungen und Hintergrunddokumentationen wurden berücksichtigt. Diese ersetzen an den Stellen der Bemessungsmethoden die bisherigen Ausführungen. Hier wurden auch die Begrifflichkeiten auf den aktuellen Stand überführt, sofern diese für das Verständnis erforderlich sind. Dort, wo statische und mechanische Grundlagen unverändert gültig sind, wurde hierauf verzichtet um den Stil des Buches zu erhalten. Hier wurden redaktionelle Änderungen vorgenommen.

Im Bereich des Brückenbaus wurden die DIN Fachberichte mittlerweile ebenfalls durch die entsprechenden Eurocodes ersetzt, weshalb auch dieses Kapitel überarbeitet wurde. Hierbei wurden insbesondere Aspekte der aktuellen Bemessung und der Ermüdungssicherheit betrachtet.

Das Buch ist weiterhin in erster Linie als Lehrbuch für den interessierten Bauingenieur aber auch für Studierende mit der Vertiefung des konstruktiven Bereichs zu sehen, die Anregungen und Informationen zu den verschiedenen Themengebieten des Stahlbaus suchen.

Besonderer Dank gilt Herrn Prof. Petersen für das entgegenbrachte Vertrauen und die Übergabe seiner Manuskripte. Darüber hinaus danken die Verfasser den Mitarbeitern an Ihren Lehrstühlen und Hochschulen für Ihre Unterstützung. Des Weiteren sei dem Verlag und hier insbesondere der Leitung des Baulektorats, Herrn Ralf Harms und Frau Annette Prenzer, für Ihre Unterstützung bei der Erstellung der neuen Auflage gedankt.

**Jörg Laumann**

Aachen

im September 2020

# Vorwort zur 4. Auflage

---

Der Bitte des Verlages folgend, hat der Autor das Buch umfassend überarbeitet. Das Werk erscheint in neuem Layout. – An vielen Stellen wurde der Inhalt neu abgefasst, ergänzt und aktualisiert. Um den Umfang des Buches in Grenzen zu halten, waren Kürzungen bedauerlicher Weise unvermeidlich. So sind die ehemaligen Kapitel

- Allgemeine technische, wirtschaftliche und historische Aspekte,
  - Nachweis der Tragsicherheit und Gebrauchstauglichkeit (gemeint ist die Sicherheitstheorie),
  - Kranbahnen und
  - Behälter
- weg gefallen. Auch hielt es der Verfasser für geboten, das Kapitel
- Stahlverbundbau

entfallen zu lassen: Der Stahlverbundbau hat sich in den zurückliegenden Jahrzehnten zu einer derart bedeutenden und eigenständigen Bauweise entwickelt, dass ihm eine ausreichend gründliche Neubearbeitung der Thematik im Rahmen dieses Buches nicht möglich erschien.

Die Abfassung des Buches wurde durch den Umstand erleichtert, dass es für eine Reihe wichtiger Sachverhalte neue normative Regelungen gibt: DIN EN 10025 (Baustähle), DIN EN 12944 (Korrosionsschutz), DIN EN ISO 1337 (Brückenlager) und andere. – Inzwischen liegt der Eurocode in deutscher Sprache vollständig vor. Der gesamte Code umfasst ca. 6000 Seiten. Für den Stahlbau liegt der Umfang bei ca. 800 Seiten. Die Einführung des Code als Technische Baubestimmung setzt nach M. d. Autors die Abfassung fundierter Kommentare zu den einzelnen Teilen voraus, ähnlich wie sie seinerzeit von den Obleuten der zuständigen Ausschüsse der Stahlbau-Grundnormen-Reihe DIN 18800, Teile 1 bis 4 und 7, erarbeitet worden sind. Aus ihnen geht nachvollziehbar hervor, warum die einzelnen Inhalte im Ausschuss so geregelt wurden, wie abgefasst und nicht anders. Bei solcherart entstandenen Normen besteht die begründete Vermutung, dass deren Inhalte als ‘anerkannte Regeln der Technik’ zu werten sind. Dazu gehört auch die der Fachöffentlichkeit eingeräumte Möglichkeit zum Entwurf einer neuen Norm (zum Gelbdruck) Stellung zu nehmen. – Da dem Autor die künftige Umsetzung des Eurocode nicht bekannt ist, bezieht er sich inhaltlich auf die im Jahre 2008 veröffentlichten Ausgaben der Stahlbau-Grundnormen. Wo geboten, werden die entsprechenden Regeln des Eurocode behandelt, ausgenommen die Nachweise gegen den Grenzzustand ‘Materialermüdung’. Die in der 1. bis 3. Auflage des Buches begründeten Vorbehalte gegen die diesbezüglichen Regeln bestehen für den Verfasser unverändert.

Für die langjährige Unterstützung bei der Textfassung dankt der Autor Frau Bärbel Hill sehr herzlich, auch den Mitarbeitern des Verlags. Dem Verlag

insgesamt, vertreten durch den Leiter des Baulektorats, Herrn Dipl.-Ing. Ralf Harms, dankt der Verfasser aufrichtig für die entgegenkommende Zusammenarbeit in den zurückliegenden Jahrzehnten.

**Christian Petersen**

Ottobrunn

im August 2012

# Vorwort (zur 1. bis 3. Auflage, Auszug)

---

Das Bauen einer Behausung zählt seit den fernsten Urzeiten zu den Grundbedürfnissen des Menschen. Zunächst wurden die Hütten aus Holz und Schilf gefügt, später aus Stein und Lehm. Unter den Römern entwickelte sich erstmals eine gehobene Bautechnik, u. a. mit der Vollendung der Gewölbebauweise: Die Baukultur stand in hoher Blüte: Neben Zweckbauten wie Häuser, Villen, Straßen, Brücken, Aquädukte und Bastionen traten Tempel, Paläste, Arenen, Stadien und Museen; so ist es über alle Kulturepochen hinweg bis zum heutigen Tage geblieben. Es war der römische Baumeister und Architektur-Theoretiker VITRUVIUS POLLIO, der um 25 v. Chr. mit seinem zehnteiligen Buch 'De architectura' das erste umfassende Werk über die Baukunst und Bautechnik, unter Einbindung der von den Griechen überlieferten Traditionen, verfasste.

firmitatis, utilitatis, venustatis

waren die von VITRUV postulierten Prinzipien. Sie gelten bis heute: firmitatis ist die Haltbarkeit und Standfestigkeit, wir sprechen von Tragfähigkeit; utilitatis steht für Nützlichkeit und Zweckentsprechung, im heutigen Verständnis handelt es sich um Gebrauchstauglichkeit; mit venustatis schließlich ist die Schönheit gemeint, der erfreuliche Anblick, Ästhetik und humane Proportion. In unserer Zeit haben neben den genannten, die Prinzipien der Wirtschaftlichkeit und des schonenden Umgangs mit Baugrund, Umwelt und Rohstoffen, also angemessene Ökonomie und Ökologie, gleichrangige Bedeutung.

Setzt man den Beginn der Bautechnik mit der römischen gleich, ist die Eisenbautechnik, deren Beginn mit dem Bau der gusseisernen Bogenbrücke über den Severn bei Coalbrookdale im Jahre 1778 gleichgesetzt wird, im Vergleich zur seither verstrichenen 2000jährigen Spanne eine junge Bauweise. Der Eisenbau zwang die Bautechniker zu einer gänzlich neuen Orientierung: Das Bauen auf der Grundlage von Empirie und Intuition alleine genügte nicht mehr. Der neue Werkstoff Eisen (Stahl, wie wir heute sagen) erforderte einen rationelleren und rationaleren Umgang als es ehemals üblich war: Es bedurfte vor allem einer wissenschaftlichen Abklärung der Materialeigenschaften. Für jedes Bauwerk aus Eisen war ein statischer Tragsicherheitsnachweis zu führen und die Konstruktion funktions- und montagegerecht einschließlich der Verbindungen exakt durchzubilden. Diese Entwicklung ging mit dem Entstehen des Ingenieurwesens und der Ingenieurwissenschaften einher. Letztere erarbeitet mit experimentellen und analytischen Methoden aus den Bedürfnissen der Praxis heraus jene Grundlagen und Verfahren, die in der Technik bei der Planung, beim Entwurf und bei der Berechnung eines technischen Werkes benötigt werden. Hiermit war und ist eine Mathematisierung in allen technischen Bereichen verbunden; sie ist keinesfalls abgeschlossen und findet in unseren Tagen in den computerorientierten Entwurf-, Berechnungs- und Fertigungsmethoden ihre Fortsetzung. – Für den Studierenden des Bauingenieurwesens, speziell bei Vertiefung im Konstruktiven Ingenieurbau, bietet die Aneignung fundierter baustoffkundiger, baumechanischer und konstruktiver Kenntnisse und Fertigkeiten nach aller Erfahrung die beste Gewähr für künftig erfolgreiches Tun; der theoretischen Ausrichtung während des Studiums kommt dabei große Bedeutung zu, nicht nur wegen der intellektuellen Schulung ('Nicht viel Wissen, viel Denken muss man üben',

DEMOKRITOS, um 460–370 v. Chr.), sondern auch, weil die Theorie das Ergebnis wissenschaftlichen Denkens in einer verallgemeinerungs- und abruffähigen Form bündelt. Theorie ist daher etwas überaus Nützliches und Praktisches, gleichwohl für den Ingenieur immer nur Hilfsmittel. Für einen an einer Hochschule mit technischer Ausrichtung Lehrenden ist es eine Herausforderung, sowohl die wissenschaftlichen Grundlagen als auch die praxisbezogenen Sachverhalte, jeweils gleichzeitig in der gebotenen Breite und Tiefe und dennoch bei Beschränkung auf das Wesentliche, zur Erziehung einer für den Ingenieurberuf befähigenden Qualifikation zu vermitteln. Wie der Verf. diese Aufgabe an der Universität der Bundeswehr München im Fach Stahlbau zu lösen versuche, möge das vorliegende Buch zeigen. Es versteht sich, dass nicht der gesamte Inhalt des Werkes in den Lehrveranstaltungen behandelt werden konnte. Eine derartige Überfrachtung wäre unsinnig und schädlich zugleich. Bei der großen Fülle des heutigen Wissens einerseits und der vergleichsweise geringen Zahl von Verfügungsstunden innerhalb des Bauingenieurstudiums andererseits, können in den Fachvorlesungen nur die wirklich wichtigen und verständnisschwierigen Grundlagen behandelt werden. Um dem Studierenden die Möglichkeit zu geben, diese (eher exemplarisch behandelten) Inhalte in den Gesamtzusammenhang des Faches einzuordnen, benötigt er eine das Fachgebiet umspannende Monografie. In dieser kann er sich über die Vorlesungen und Übungen hinaus, z. B. bei der Vorbereitung seiner Seminarvorträge, informieren; umfassende Literaturhinweise sollen ihn dabei unterstützen. Nach W. v. HUMBOLDT (1767–1835) setzt der Erwerb wissenschaftlicher Einsicht ‘notwendig Freiheit und hülfreiche Einsamkeit’ voraus, ‘und aus diesen beiden Punkten fließt zugleich die ganze äußere Organisation der Universität’. In diesem Sinne versteht sich das Buch in erster Linie als Lehrbuch. ...

Neubiberg  
1987/1992

# Inhaltsverzeichnis

---

<b>1</b>	<b>Werkstoff Stahl – Werkstoffeigenschaften – Werkstoffprüfung</b> .....	<b>1</b>
	<i>Markus Feldmann</i>	
1.1	<b>Stahlerstellung</b> .....	3
1.2	<b>Grundlagen der Metallkunde</b> .....	8
1.2.1	Kristalle, Mischkristalle, Phasen .....	9
1.2.2	Aufbau der Legierungen – Zustandsschaubilder .....	11
1.2.3	Eisen-Kohlenstoff-Schaubild .....	16
1.2.4	Technologische Einstellung der Stahleigenschaften .....	18
1.3	<b>Werkstoffprüfung – Mechanische Eigenschaften</b> .....	29
1.3.1	Materialhärte .....	30
1.3.2	Materialfestigkeit und -zähigkeit .....	32
1.3.3	Bauteilfestigkeit und Bauteilzähigkeit (Bauteilduktilität) .....	47
1.3.4	Ermüdungsfestigkeit (Dauerfestigkeit) .....	60
1.3.5	Kerschlagzähigkeit .....	90
1.4	<b>Stähle für den Stahlbau</b> .....	92
1.4.1	Allgemeines – Bezeichnungssystem .....	92
1.4.2	Bezeichnungssystem für Baustähle (Lieferbedingungen) .....	94
1.4.3	Baustähle – DIN EN 10025 .....	96
1.4.4	Nichtrostende Stähle – DIN EN 10088 .....	102
1.4.5	Druckbehälterstähle – DIN EN 10028 .....	105
1.4.6	Weitere Stahlsorten .....	107
1.4.7	Stahlguss .....	108
1.4.8	Eisenguss (Gusseisen) .....	108
1.4.9	Stahlerzeugnisse– Lieferformen – Begriffe .....	110
1.5	<b>Korrosion – Korrosionsschutz</b> .....	113
1.5.1	Elektrochemische Korrosion in der Atmosphäre .....	113
1.5.2	Fertigungsbeschichtungen (FB) – Walzstahlkonservierung .....	116
1.5.3	Korrosionsschutz durch Beschichtungen .....	117
1.5.4	Korrosionsschutz durch metallische Überzüge .....	120
1.5.5	Spannungsrisskorrosion und Schwingungsrisskorrosion .....	125
	<b>Literatur</b> .....	126
<b>2</b>	<b>Elasto-statischer Festigkeitsnachweis</b> .....	<b>129</b>
	<i>Jörg Laumann</i>	
2.1	<b>Vorbemerkungen</b> .....	131
2.2	<b>Tragsicherheitsnachweise nach Eurocode 3</b> .....	140
2.3	<b>Normalspannungen infolge Zug/Druck und Biegung</b> .....	143
2.3.1	Berechnungsformel .....	143
2.3.2	Nachweis der Zug- und Druckspannungen .....	144
2.3.3	Grenzzugkräfte einseitiger Winkelanschlüsse .....	148
2.3.4	Beispiele .....	148
2.3.5	Nachweis der Biegespannungen .....	154

2.3.6	Beispiel .....	157
2.3.7	Zur Berechnung der Trägheitsmomente .....	160
2.3.8	Aufteilung eines Biegemomentes auf die Teile eines Querschnittes .....	162
2.4	<b>Schubspannungen infolge Querkraft</b> .....	164
2.4.1	Berechnungsformel .....	164
2.4.2	Nachweis der Schubspannungen.....	169
2.5	<b>Herleitung einiger Berechnungsformeln – Beispiele/Ergänzungen</b> .....	173
2.6	<b>Mitragende (effektive) Breite</b> .....	185
2.6.1	Allgemeines .....	185
2.6.2	Berücksichtigung von Schubverzerrungen nach DIN EN 1993-1-5 .....	188
2.7	<b>Experimenteller Befund</b> .....	191
2.8	<b>Schubmittelpunkt</b> .....	192
2.8.1	Problemstellung – Biegung von [-Profilen .....	192
2.8.2	Beispiele.....	196
2.8.3	Alternative Berechnungsform .....	198
2.9	<b>Schubspannungen infolge Torsion</b> .....	200
2.9.1	Gegenüberstellung: Primärtorsion – Sekundärtorsion .....	200
2.9.2	Primärtorsion (ST-VENANTsche Torsion) .....	202
2.9.3	Einführung in die Theorie der Sekundärtorsion.....	210
2.10	<b>Nachweis kombinierter Normal- und Schubspannungszustände</b> .....	214
2.10.1	Vergleichsspannung bei statischer Beanspruchung .....	214
2.10.2	Beispiele.....	218
2.10.3	Vergleichsspannung bei dynamischer Beanspruchung .....	226
	<b>Literatur</b> .....	227
3	<b>Elasto-statische Berechnung der Stabtragwerke (Grundzüge)</b> .....	229
	<i>Manuel Krahwinkel</i>	
3.1	<b>Einführung</b> .....	230
3.2	<b>Kräfte und Momente</b> .....	234
3.3	<b>Grad der statischen Bestimmtheit</b> .....	235
3.3.1	Ebene Stabtragwerke.....	235
3.3.2	Räumliche Stabtragwerke.....	242
3.4	<b>Berechnung der Stabtragwerke</b> .....	242
3.4.1	Statisch bestimmte Stabtragwerke .....	242
3.4.2	Statisch unbestimmte Stabtragwerke .....	243
3.4.3	Berechnung der Verformungen (Verschiebungen und Verdrehungen).....	244
3.4.4	Einflusslinien für Stütz-, Schnitt- und Verformungsgrößen .....	253
3.5	<b>Allgemeine Hinweise zu den Berechnungsverfahren der Stabstatik</b> .....	256
	<b>Literatur</b> .....	257
4	<b>Plasto-statische Berechnung der Stabtragwerke (Grundzüge)</b> .....	259
	<i>Matthias Kraus</i>	
4.1	<b>Querschnittstragfähigkeit eines Zugstabes</b> .....	261
4.1.1	Eigenspannungsfreier Querschnitt .....	261
4.1.2	Eigenspannungsbehafteter Querschnitt .....	261
4.1.3	Berücksichtigung der Verfestigung .....	264
4.2	<b>Fließzonentheorie</b> .....	267

4.2.1	Exemplarische Darstellung am Einfeldbalken mit Rechteckquerschnitt .....	267
4.2.2	Verallgemeinerung .....	276
4.3	<b>Fließgelenktheorie</b> .....	276
4.3.1	Querschnittstragfähigkeit eines Biegestabes .....	276
4.3.2	Fließgelenkhypothese .....	281
4.3.3	Be- und Entlastung .....	285
4.3.4	Einfeldträger – Durchlaufträger .....	289
4.3.5	Tragkraftsätze .....	302
4.3.6	Rahmentragwerke .....	304
4.3.7	Normalkraft- und Querkraftinteraktion .....	317
4.4	<b>Sicherheitsaspekte</b> .....	335
4.4.1	Zur Entwicklung der Fließgelenktheorie ('Traglastverfahren') .....	335
4.4.2	Zur Materialfrage .....	338
4.4.3	Einrechnung der Verfestigung .....	339
4.4.4	Rotationskapazität .....	341
4.4.5	Zur Frage der Systemeignung .....	355
4.4.6	Sicherheit gegen lokale Instabilität .....	357
4.4.7	Sicherheit gegen globale Instabilität .....	358
4.5	<b>Regelwerke – Baupraktischer Tragsicherheitsnachweis</b> .....	359
4.5.1	Rückblick auf DIN 18800-1 und -2: 2008-11 .....	359
4.5.2	EUROCODE 3 (DIN EN 1993-1-1:2010-12 und NA) .....	371
4.6	<b>Fließlinientheorie</b> .....	377
4.6.1	Hypothese der Fließlinientheorie .....	377
4.6.2	Dreieckplatte mit freiem Rand unter Gleichlast .....	379
4.6.3	Rechteckplatte unter Gleichlast .....	383
4.6.4	Kreisplatte unter Gleichlast .....	384
4.6.5	Rechteckplatte unter mittiger Einzellast .....	385
4.6.6	Anwendung der Fließlinientheorie auf Schraubenverbindungen .....	390
	<b>Literatur</b> .....	394
5	<b>Stabilitätsnachweise (Knicken – Kippen – Beulen)</b> .....	399
	<i>Markus Feldmann</i>	
5.1	<b>Einführung in die Grundlagen der Stabilitätstheorie</b> .....	401
5.1.1	Statisches und energetisches Stabilitätskriterium .....	402
5.1.2	System A (Zweistabsystem mit Drehfeder, vgl. ■ Abb. 5.3) .....	404
5.1.3	System B (Dreistabsystem mit Drehfedern, vgl. ■ Abb. 5.3) .....	409
5.1.4	System C (Zweistabsystem mit Verschiebungsfeder, vgl. ■ Abb. 5.3) .....	414
5.1.5	System D (Dreistabsystem mit Verschiebungsfedern, vgl. ■ Abb. 5.3) .....	418
5.2	<b>Stabtragwerke – Theorie II. Ordnung</b> .....	421
5.2.1	Einführung: Theorie II. Ordnung – Verzweigungstheorie .....	421
5.2.2	Differenzialgleichungsverfahren 1. Art .....	425
5.2.3	Differenzialgleichungsverfahren 2. Art .....	438
5.2.4	Verformungsgrößenverfahren Theorie II. Ordnung .....	444
5.3	<b>Tragsicherheitsnachweis der Stabwerke (Stützen und Träger)</b> .....	481
5.3.1	Anmerkungen zur Normensituation .....	481
5.3.2	Lokale und globale Instabilität .....	483
5.3.3	Zur normativen Festlegung der Sicherheitselemente .....	483

5.3.4	Europäische Knickspannungslinien .....	489
5.3.5	Rangordnung der Tragsicherheitsnachweise .....	496
5.3.6	Verzweigungslösungen für Stabwerke (Stäbe und Träger) .....	516
5.3.7	Mehrteilige Druckstäbe .....	543
5.4	<b>Tragsicherheitsnachweis der Platten und Plattentragwerke</b> .....	558
5.4.1	Allgemeine Sicherheitsfragen .....	558
5.4.2	Einfache Lösungen der linearen Beultheorie .....	562
5.4.3	Tragsicherheitsnachweis unausgesteifter Platten .....	568
5.4.4	Beispiele .....	574
5.4.5	Ausgesteifte Rechteckplatten .....	576
5.4.6	Grenzverhältnis $b/t$ dünnwandiger Teile von Druck- und Biegegliedern .....	577
5.4.7	Überkritische Tragfähigkeit .....	578
5.5	<b>Tragsicherheitsnachweis der Schalen und Schalentragwerke</b> .....	584
5.5.1	Allgemeine Sicherheitsfragen – Nachweiskonzept .....	584
5.5.2	Ideale Beulspannung .....	587
	<b>Literatur</b> .....	588
6	<b>Verbindungstechnik I: Schweißverbindungen</b> .....	589
	<i>Thomas Ummenhofer</i>	
6.1	<b>Werkstoffe</b> .....	591
6.1.1	Stähle – Grundwerkstoffe .....	591
6.1.2	Zusatzwerkstoffe .....	592
6.1.3	Bauaufsichtliche Regelungen .....	592
6.2	<b>Schweißprozesse</b> .....	595
6.2.1	Schmelzschweißen .....	595
6.3	<b>Konstruktive Ausbildung von Schweißnähten</b> .....	603
6.3.1	Brennschneiden .....	603
6.3.2	Plasmaschneiden .....	604
6.3.3	Nahtformen .....	605
6.4	<b>Tragsicherheitsnachweis von Schweißverbindungen</b> .....	607
6.4.1	Stumpfnähte .....	608
6.4.2	Kehlnähte .....	609
6.4.3	Kennzeichnung und Sinnbilder der Schweißnähte .....	614
6.4.4	Bemessungsbeispiele .....	614
6.4.5	Theorie der Kehlnähte .....	634
6.4.6	Zur Theorie, Berechnung und Ausbildung von Schweißverbindungen .....	642
6.5	<b>Sicherheitsaspekte</b> .....	642
6.5.1	Eigenspannungen (Schrumpfspannungen) .....	642
6.5.2	Wärmeeinflusszone – Gefügewandlung .....	644
6.5.3	Grobkornbildung .....	646
6.5.4	Seigerung – Bruch durch Dopplung .....	647
6.5.5	Terrassenbildung – Terrassenbruch .....	648
6.5.6	Alterung – Rekalterung .....	649
6.5.7	Rissarten beim Abkühlen der Schweißnaht .....	650
6.5.8	Sprödbruch .....	651
6.6	<b>Allgemeine Anhalte zur Konstruktion und Fertigung</b> .....	656

6.7	<b>Qualifikationsnachweis</b> .....	658
6.7.1	Ausführungsklassen (Execution Classes) .....	658
6.7.2	Werkseigene Produktionskontrolle (WPK) .....	659
	<b>Literatur</b> .....	660
<b>7</b>	<b>Verbindungstechnik II: Schrauben- und Nietverbindungen</b> .....	<b>665</b>
	<i>Natalie Stranghöner</i>	
7.1	<b>SL- und GV-Verbindungen – Grundsätzliche Unterscheidungsmerkmale (■ Abb. 7.2)</b> .....	667
7.2	<b>Werkstoffe – Normung</b> .....	669
7.2.1	Niete .....	669
7.2.2	Schrauben .....	670
7.3	<b>SL- und SLP-Verbindungen, vgl. auch DIN 18800-7:2008 bzw. DIN EN 1993-1-8: Kategorie A</b> .....	679
7.3.1	Fertigung der Nietverbindungen .....	679
7.3.2	Fertigung der SL- und SLP-Schraubenverbindungen .....	681
7.3.3	Durchmesser und Anordnung der Niete und Schrauben .....	686
7.3.4	Tragverhalten bei Scher-, Lochleibungs- und Zugbeanspruchung .....	689
7.3.5	Tragsicherheitsnachweise der SL- und SLP-Verbindungen .....	693
7.4	<b>GV- und GVP-Verbindungen (DIN EN 1993-1-8: Kategorie B/C)</b> .....	724
7.4.1	Fertigung der GV- und GVP-Verbindungen .....	724
7.4.2	Tragverhalten und Versagensformen bei Scher- und Lochleibungsbeanspruchung .....	731
7.4.3	Tragverhalten und Versagensform bei Zugbeanspruchung .....	733
7.4.4	Tragsicherheitsnachweis der GV- und GVP-Verbindungen .....	736
7.5	<b>Versuche zum Tragverhalten von Schraubenverbindungen</b> .....	743
7.5.1	Vorbemerkungen .....	743
7.5.2	Projekt 1: Zug- und Scherversuche an Schraubenbolzen, Teil I .....	743
7.5.3	Projekt 2: Zug- und Scherversuche an Schraubenbolzen, Teil II .....	745
7.5.4	Projekt 3: Tragversuche an SL- und VSL-Verbindungen .....	746
7.5.5	Projekt 4: Vergleichende Tragversuche an SL-, SLP-, GV- und GVP-Verbindungen (■ Abb. 7.77) .....	751
7.5.6	Projekt 5: Abschertragfähigkeit mehrerer hintereinander liegender Schrauben .....	758
7.5.7	Schraubenverbindung als diskontinuierliche Scherverbindung .....	762
7.6	<b>Vorgespannte Schraubenverbindungen bei zentrischer und exzentrischer Zugbeanspruchung</b> .....	766
7.6.1	Vorbemerkung .....	766
7.6.2	Verspannungsdreieck .....	766
7.6.3	Federmodell bei vorgespannten Stoß- und Verankerungskonstruktionen .....	770
7.6.4	Stirnplatten- und Flanschverbindungen .....	772
7.7	<b>Ermüdungsfestigkeit auf Zug und Biegung beanspruchter Schraubenverbindungen</b> .....	791
7.7.1	Ermüdungsfestigkeit axial zugbeanspruchter Schrauben .....	791
7.7.2	Beispiel: Kopfplattenstoß in einem Kranbahnträger .....	796
7.7.3	Ermüdungsfestigkeit von auf Zug und Biegung beanspruchten Schraubenverbindungen .....	799
	<b>Literatur</b> .....	807

8	<b>Verbindungstechnik III: Bolzenverbindungen mit Augenlaschen</b> .....	815
	<i>Natalie Stranghöner</i>	
8.1	<b>Einsatzbereiche – Allgemeine Hinweise</b> .....	816
8.2	<b>Statische Grenztragfähigkeit von Augenstab und Bolzen</b> .....	819
8.2.1	Vorbemerkungen .....	819
8.2.2	Ehemalige Bemessungsansätze für Augenbleche .....	821
8.2.3	Bemessungsansatz für Bolzen.....	822
8.2.4	Statische Tragversuche – Bezug zum ehemaligen Nachweisformat .....	824
8.2.5	Tragsicherheitsnachweis nach DIN 18 800–1:2008.....	827
8.2.6	Tragsicherheitsnachweis nach DIN EN 1993–1-8 .....	829
8.2.7	Beispiel zum Tragsicherheitsnachweis.....	830
8.2.8	Statische Tragversuche an Laschen mit DIN-Auge .....	833
8.2.9	Ergänzende Hinweise zur konstruktiven und rechnerischen Auslegung .....	835
8.2.10	Augenstabformen im Stahlwasserbau .....	838
8.3	<b>Ermüdungsfestigkeitsnachweis</b> .....	839
8.3.1	Kerbfaktoren für Augenstäbe .....	839
8.3.2	Ermüdungsversuche an Laschen mit DIN-Auge .....	842
8.3.3	Nachweisformat.....	843
	<b>Literatur</b> .....	845
9	<b>Verbindungstechnik IV: Sondertechniken</b> .....	847
	<i>Markus Feldmann</i>	
9.1	<b>Vorbemerkungen</b> .....	848
9.2	<b>Punktschweißen</b> .....	848
9.3	<b>Bolzenschweißen</b> .....	851
9.4	<b>Schweißen von Kranschienenstößen</b> .....	853
9.5	<b>Schließringbolzen</b> .....	855
9.6	<b>Blindniete</b> .....	855
9.7	<b>Blechschraben – Setzbolzen</b> .....	856
9.8	<b>Dübel/Anker</b> .....	857
9.9	<b>Trägerklemmen</b> .....	859
9.10	<b>Metallkleben</b> .....	860
9.10.1	Klebtechnik.....	860
9.10.2	Herleitung der Schubspannungsverteilung in einer Klebverbindung nach Volkersen/Klein .....	864
	<b>Literatur</b> .....	870
10	<b>Ausgewählte Kapitel aus dem Stahlhochbau</b> .....	875
	<i>Manuel Krahwinkel, Christian Petersen und Thomas Ummenhofer</i>	
10.1	<b>Toleranz- und Modulordnung – Bewegungsfugen</b> .....	877
10.1.1	Toleranzordnung im Maschinenbau .....	877
10.1.2	Toleranzordnung im Stahlbau – Ausführung.....	879
10.1.3	Toleranzordnung im Hochbau – Ausführung .....	879
10.1.4	Maß- und Modulordnung.....	881
10.1.5	Bewegungsfugen.....	883
10.2	<b>Dauerhaftigkeit – Korrosionsschutz</b> .....	884
10.3	<b>Baulicher Brandschutz</b> .....	885
10.3.1	Allgemeine Hinweise .....	885

10.3.2	Brandverlauf und Brandbelastung .....	886
10.3.3	Verhalten ungeschützter und geschützter Bauteile und Systeme bei Brandeinwirkung .....	888
10.3.4	DIN 4102 – Bauordnungen.....	893
10.3.5	Baulicher Brandschutz durch klassifizierte Maßnahmen.....	895
10.4	<b>Nachweis der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit</b> .....	899
10.4.1	Nachweis der Tragfähigkeit.....	899
10.4.2	Imperfektionen.....	901
10.4.3	Nachweis der Gebrauchstauglichkeit .....	901
10.5	<b>Vorspannung</b> .....	907
10.6	<b>Stützen</b> .....	910
10.6.1	Stützenarten – Querschnittsformen.....	910
10.6.2	Stützenstöße .....	913
10.6.3	Stützenfußkonstruktionen.....	916
10.6.4	Köcherfundamente.....	961
10.7	<b>Vollwandträger</b> .....	977
10.7.1	Konstruktive Ausbildung .....	977
10.7.2	Nachweis der Tragsicherheit und Gebrauchstauglichkeit .....	984
10.7.3	Trägerstöße .....	989
10.8	<b>Querkraftbeanspruchte ('gelenkige') Trägeranschlüsse</b> .....	1004
10.8.1	Allgemeine Konstruktionshinweise .....	1004
10.8.2	Beispiele – Ergänzungen.....	1015
10.9	<b>Querkraft- und momentenbeanspruchte ('biegesteife')</b> <b>Trägeranschlüsse – Rahmenecken</b> .....	1020
10.9.1	Allgemeine Konstruktionshinweise .....	1020
	<b>Literatur</b> .....	1039
11	<b>Stahlleichtbau</b> .....	1041
	<i>Jörg Laumann</i>	
11.1	<b>Einführung</b> .....	1043
11.2	<b>Zum Tragverhalten dünnwandiger Bauteile im überkritischen Bereich</b> .....	1043
11.3	<b>Herstellung der Trapezbleche – Profiltypen</b> .....	1049
11.4	<b>Statische Funktion der Stahltrapezprofile</b> .....	1057
11.5	<b>Verwendung der Trapezprofile als lastabtragende Biegeglieder</b> .....	1058
11.5.1	Zur Optimierung der Profilform.....	1058
11.5.2	Bestimmung der zulässigen Tragfähigkeiten mittels Versuchen.....	1059
11.5.3	Tragsicherheits- und Gebrauchtauglichkeitsnachweis nach dem neuen Sicherheitskonzept .....	1067
11.6	<b>Verwendung der Trapezprofile als Schubfelder</b> .....	1069
11.6.1	Tragwirkung und konstruktive Ausbildung der Schubfelder .....	1069
11.6.2	Einführung in die Schubfeldtheorie.....	1071
11.6.3	Anwendung der Schubfeldtheorie auf Stahltrapezprofile.....	1077
11.6.4	Beispiele.....	1080
11.7	<b>Kaltprofile</b> .....	1091
11.7.1	Allgemeine Angaben .....	1091
11.7.2	Ausbildung von kaltgeformten Z-Pfetten .....	1093
11.8	<b>Bemessung im Grenzzustand der Tragfähigkeit</b> .....	1098
11.8.1	Versagensmechanismen.....	1098

11.8.2	Wirksame Querschnitte.....	1099
11.8.3	Nachweise.....	1100
11.9	<b>Drehbehinderung aus Koppelfetten mit dünnwandigen kaltgeformten Z-Profilen</b> .....	1100
11.9.1	Anteile der Drehbehinderung .....	1104
11.9.2	Experimentelle Untersuchungen zur Drehfedersteifigkeit $C_{\vartheta A,k}$ aus der Anschlussverformung .....	1107
11.9.3	Analytische Nachbildung der Steifigkeit $C_{\vartheta A,k}$ .....	1110
	<b>Literatur</b> .....	1114
12	<b>Seile und Seilwerke</b> .....	1119
	<i>Natalie Stranghöner</i>	
12.1	<b>Seile, Bündel und Kabel</b> .....	1120
12.1.1	Seildraht.....	1120
12.1.2	Seilarten.....	1120
12.1.3	Seilendverbindungen.....	1122
12.1.4	Korrosionsschutz .....	1127
12.1.5	Querschnittsfläche, Gewicht und Tragkraft von Seilen .....	1128
12.1.6	Tragsicherheitsnachweis bei vorwiegend ruhender Belastung.....	1129
12.1.7	Tragsicherheitsnachweis bei nicht vorwiegend ruhender Belastung .....	1130
12.1.8	Dehnverhalten der Seile – Verformungsmodul.....	1135
12.2	<b>Stangen als Zugglieder</b> .....	1137
12.3	<b>Seilstatik</b> * .....	1139
12.3.1	Herleitung der Seilgleichung .....	1139
12.3.2	Parabel .....	1141
12.3.3	Katenoide (Kettenlinie) .....	1149
12.3.4	Beispiele und Ergänzungen.....	1158
	<b>Literatur</b> .....	1193
13	<b>Türme und Maste</b> .....	1197
	<i>Markus Feldmann</i>	
13.1	<b>Einsatzgebiete der Türme und Maste* – Begriffe</b> .....	1199
13.1.1	Allgemeines (■ Abb. 13.1) .....	1199
13.1.2	Turmartige Bauwerke für funktechnische Zwecke (Antennenträger) .....	1203
13.1.3	Türme für Windgeneratoren .....	1205
13.1.4	Turmartige Bauwerke für andere Zwecke .....	1208
13.2	<b>Lastannahmen für Antennentragwerke</b> .....	1214
13.2.1	Allgemeine Hinweise .....	1214
13.2.2	Ungleichförmigkeit des Staudrucks.....	1215
13.2.3	Aerodynamischer Beiwert für Fachwerktürme und -maste.....	1216
13.2.4	Aerodynamischer Beiwert für Einbauten und Antennenausrüstungen.....	1221
13.2.5	Aerodynamischer Beiwert für Antennen .....	1222
13.2.6	Windbelastung bei Montagezuständen.....	1224
13.2.7	Lastannahmen bei Vereisung .....	1224
13.3	<b>Turm- und Mastausfachung</b> .....	1226
13.4	<b>Statische Berechnung der Türme und Maste</b> .....	1229
13.4.1	Allgemeine Berechnungshinweise.....	1229
13.4.2	Zur Frage der kinematischen Stabilität der Turmfachwerke .....	1234

13.4.3	Ergänzende Hinweise.....	1240
13.5	<b>Berechnung abgespannter Maste</b> .....	1241
13.5.1	Vorbemerkungen.....	1241
13.5.2	Unmittelbare Belastung der Seile.....	1245
13.5.3	Seilgleichung.....	1247
13.5.4	Federcharakteristik des dreiseiligen Abspannbündels .....	1248
13.5.5	Hinweise zur Mastberechnung.....	1253
13.5.6	Federcharakteristik von Abspannungen geringer Höhe.....	1254
13.6	<b>Dynamische Auslegung</b> .....	1258
13.6.1	Vorbemerkungen.....	1258
13.6.2	Hinweise zur Eigenfrequenzberechnung einfacher Mast- und Turmstrukturen.....	1258
13.6.3	Eigenfrequenzen und Eigenformen des Einzelseiles.....	1266
13.6.4	Eigenfrequenzen und Eigenformen abgespannter Maste .....	1269
13.6.5	Böenreaktionsfaktor bei abgespannten Masten.....	1272
13.7	<b>Berechnungsansätze nach EN 1993-3-1 (Eurocode für Türme und Masten)</b> .....	1274
13.8	<b>Zur konstruktiven Ausbildung</b> .....	1275
13.9	<b>Windenergieanlagen</b> .....	1279
13.9.1	Bauarten – Betriebsformen .....	1279
13.9.2	Zur physikalisch-technischen Auslegung von Windkraftanlagen.....	1283
13.9.3	Zur normativen Lastmodellierung .....	1287
13.10	<b>Blitzschutz</b> .....	1289
	<b>Literatur</b> .....	1293
14	<b>Stahlschornsteine</b> .....	1299
	<i>Markus Feldmann</i>	
14.1	<b>Allgemeine Hinweise zur konstruktiven Auslegung</b> .....	1300
14.1.1	Tragrohr und Rauchrohr .....	1300
14.1.2	Immissions- und rauchgastechnische Auslegung .....	1302
14.1.3	Korrosionsschutz .....	1304
14.1.4	Regelungen für die bauliche Ausbildung und Standsicherheitsberechnung .....	1305
14.2	<b>Statische Auslegung</b> .....	1305
14.2.1	Allgemeines .....	1305
14.2.2	Windlastannahmen.....	1307
14.2.3	Aerodynamische Beiwerte.....	1307
14.2.4	Verformungseinfluss Theorie II. Ordnung .....	1311
14.2.5	Nachweis des Mantelrohres.....	1316
14.2.6	Ringsteifen – Einflusslinien .....	1322
14.2.7	Mantel- und Ringsteifenbeanspruchung infolge örtlichen Winddrucks .....	1325
14.2.8	Beispiele und Ergänzungen.....	1329
14.2.9	Montagestöße.....	1333
14.2.10	Schornstein-Verankerung.....	1343
14.2.11	Kräfte im Ankerpunkt infolge M:.....	1357
14.3	<b>Dynamische Auslegung</b> .....	1360
14.3.1	Vorbemerkungen.....	1360
14.3.2	Hinweise zur Eigenfrequenzberechnung.....	1361
14.3.3	Böeninduzierte Schwingungen .....	1368
14.3.4	Wirbelinduzierte Schwingungen.....	1377
	<b>Literatur</b> .....	1411

15	<b>Ausgewählte Kapitel aus dem Stahlbrückenbau</b> .....	1415
	<i>Jörg Frickel</i>	
15.1	<b>Bauformen</b> .....	1417
15.1.1	Gliederung – Systeme – Grundanforderungen.....	1417
15.1.2	Eisenbahnbrücken.....	1421
15.1.3	Straßenbrücken.....	1442
15.1.4	Fußgängerbrücken (Geh- und Radwegbrücken).....	1455
15.2	<b>Nachweis der Tragsicherheit und der Gebrauchstauglichkeit</b> .....	1460
15.2.1	Eisenbahnbrücken.....	1460
15.2.2	Straßenbrücken.....	1464
15.2.3	Fußgängerbrücken (Geh- und Radwegbrücken).....	1468
15.2.4	Weitere Berechnungs- und Bemessungsansätze.....	1468
15.3	<b>Ausgewählte Nachweise</b> .....	1469
15.3.1	Ergänzende Hinweise.....	1469
15.3.2	Scheinbarer Elastizitätsmodul von Schrägseilen.....	1472
15.3.3	Verbände.....	1478
15.3.4	Nebenspannungen in Fachwerkbrücken.....	1479
15.3.5	Hängestangen von Stabbogenbrücken.....	1483
15.3.6	Hängebrücken – Grundlagen der Berechnung.....	1488
15.3.7	Dynamische Einflüsse beim Brückenbetrieb.....	1499
15.3.8	Aeroelastische Einwirkungen auf Brücken.....	1505
15.3.9	Personeninduzierte Schwingungen von Fußgängerbrücken.....	1517
15.4	<b>Brückenlager</b> .....	1529
15.4.1	Vorbemerkungen.....	1529
15.4.2	Lageranordnung.....	1531
15.4.3	HERTZsche Pressung.....	1536
15.4.4	Pressungsverteilung gegen Anschlagflächen.....	1541
15.4.5	Abwälzkinematik.....	1544
15.4.6	Behelfe für die Berechnung von Kreisplatten.....	1547
15.4.7	Berechnungsbeispiel.....	1551
15.4.8	Lagerplatten auf elastischem Halbraum.....	1558
15.4.9	Lagerformen.....	1564
	<b>Literatur</b> .....	1575
16	<b>Elasto-statische Biegetheorie, insbesondere für dünnwandige Stäbe</b> .....	1579
	<i>Matthias Kraus</i>	
16.1	<b>Vorbemerkungen</b> .....	1582
16.2	<b>Flächenmomente</b> .....	1582
16.3	<b>Stäbe mit dünnwandigem offenen Querschnitt</b> .....	1585
16.3.1	Berechnung der Biege- und Schubspannungen ohne Kenntnis der Hauptachsen.....	1585
16.3.2	Berechnung der Biege- und Schubspannungen bei Kenntnis der Hauptachsen.....	1590
16.3.3	Schubmittelpunkt.....	1594
16.3.4	Beispiel.....	1597
16.4	<b>Stäbe mit dünnwandigem, geschlossenem Querschnitt</b> .....	1604
16.4.1	Stäbe mit einzelligem Querschnitt.....	1605

16.4.2	Stäbe mit mehrzelligem Querschnitt.....	1608
16.4.3	Beispiele.....	1610
16.5	<b>Grundgleichung der Stabbiegung Theorie I. Ordnung</b> .....	1626
16.6	<b>Zur numerischen Berechnung der Flächenmomente</b> .....	1627
16.7	<b>Vollwandige Träger veränderlicher Höhe</b> .....	1640
16.8	<b>Berücksichtigung der Schubverzerrung bei der Stabbiegung</b> .....	1644
16.8.1	Schubsteifigkeit $S = GA_G$ – Schubkorrekturfaktor .....	1644
16.8.2	Trägerdurchbiegung infolge Querkraft .....	1648
16.8.3	Beispiele und Ergänzungen.....	1650
16.8.4	Grundgleichung der Stabbiegung Theorie I. Ordnung einschließlich Schubverzerrung .....	1652
16.9	<b>Stäbe mit starker Krümmung bei einachsiger Biegung und Normalkraft</b> .....	1653
16.9.1	Biegespannungen .....	1653
16.9.2	Radialspannungen.....	1657
16.9.3	Formänderungen.....	1658
16.9.4	Beispiele und Ergänzungen.....	1659
16.9.5	Mitwirkende Breite und Gurtspannungen bei unausgesteiften I-Querschnitten.....	1664
16.9.6	Mitwirkende Breite und Gurtspannungen bei unausgesteiften Kastenquerschnitten .....	1667
16.9.7	Experimenteller Befund.....	1669
16.9.8	Hinweise zur praktischen Ausführung .....	1673
16.9.9	Rohrkrümmer.....	1673
16.10	<b>Berechnung der Randspannungen mit Hilfe des Querschnittskerns</b> .....	1674
16.10.1	Bestimmung des Querschnittskerns .....	1674
16.10.2	Beispiele und Ergänzungen .....	1677
16.10.3	Maßgebende Wirkungsrichtung bei umlaufender Belastung.....	1681
16.11	<b>Berechnung der Spannungen bei versagender Zugzone</b> .....	1683
16.11.1	Bestimmung der klaffenden Fuge .....	1683
16.11.2	Beispiele.....	1684
16.12	<b>Zugbiegung Theorie II. Ordnung</b> .....	1691
16.13	<b>Nichtlineare Zugbiegung schlanker Stäbe mit größerem Durchhang</b> .....	1695
16.13.1	Einführung.....	1695
16.13.2	Dehnsteife Hängestäbe (■ Abb. 16.118) .....	1695
16.13.3	Dehn- und biegesteife Hängestäbe: Näherungslösungen.....	1699
16.13.4	Dehn- und biegesteife Hängestäbe: Exakte Lösung für $p = \text{konst.}$ .....	1701
16.13.5	Dehn- und biegesteife Hängestäbe: Exakte Lösung für beliebige Belastung $p(x)$ .....	1702
16.13.6	Dehn- und biegesteife Hängestäbe: Vereinfachte Lösung für $p = \text{konst.}$ .....	1707
	<b>Literatur</b> .....	1710
17	<b>Elasto-statische Torsionstheorie, insbesondere für dünnwandige Stäbe</b> .....	1715
	<i>Matthias Kraus</i>	
17.1	<b>Vorbemerkungen</b> .....	1717
17.2	<b>Torsion gerader Stäbe mit dickwandigem Querschnitt</b> .....	1718
17.2.1	Torsion ohne Behinderung der Querschnittsverwölbung (primäre, reine oder ST-VENANTSche Torsion).....	1718

17.2.2	Torsion mit Behinderung der Querschnittsverwölbung .....	1765
17.3	<b>Torsion gerader Stäbe mit dünnwandigem, offenen Querschnitt</b> .....	1766
17.3.1	Torsion ohne Behinderung der Querschnittsverwölbung (Primärtorsion) .....	1766
17.3.2	Torsion mit Behinderung der Querschnittsverwölbung (Wölbkrafttorsion = Sekundärtorsion) .....	1773
17.4	<b>Torsion gerader Stäbe mit dünnwandigem, geschlossenem Querschnitt</b> .....	1795
17.4.1	Stäbe mit einzelligem Querschnitt .....	1795
17.4.2	Beispiel: Einzelliger Kastenquerschnitt .....	1799
17.4.3	Stäbe mit mehrzelligem Querschnitt .....	1801
17.4.4	Stäbe mit gemischt offen-geschlossenem Querschnitt .....	1804
17.4.5	Beispiele und Ergänzungen .....	1806
17.5	<b>Rechenbehelfe</b> .....	1812
17.6	<b>Gebundene Biegung – Gebundene Torsion</b> .....	1813
17.7	<b>Ergänzende Hinweise</b> .....	1824
17.8	<b>Verzerrungseinfluss der sekundären Schubspannungen</b> .....	1824
17.8.1	Allgemeine Hinweise .....	1824
17.8.2	Wölbkrafttorsion geschlossener Querschnitte ohne Verzerrungseinfluss der sekundären Schubspannungen .....	1826
17.8.3	Wölbkrafttorsion geschlossener Querschnitte mit Verzerrungseinfluss der sekundären Schubspannungen .....	1830
	<b>Literatur</b> .....	1831
18	<b>Anstrengungs- und Bruchtheorie</b> .....	1837
	<i>Markus Feldmann</i>	
18.1	<b>Vorbemerkungen</b> .....	1839
18.2	<b>Ebener Spannungszustand</b> .....	1840
18.2.1	Hauptspannungen .....	1840
18.2.2	Beispiele und Ergänzungen .....	1846
18.2.3	Verzerrungen des ebenen Spannungszustandes .....	1849
18.2.4	Vergleichsspannungen bei vorwiegend ruhender (statischer) Einwirkung .....	1850
18.2.5	Vergleichsspannungen bei nicht vorwiegend ruhender (zyklischer, dynamischer) Einwirkung .....	1854
18.3	<b>Räumlicher Spannungszustand</b> .....	1855
18.3.1	Formale Vereinbarungen .....	1855
18.3.2	Verschiebungstensor .....	1855
18.3.3	Verzerrungstensor .....	1856
18.3.4	Spannungstensor .....	1860
18.3.5	HOOKESches Gesetz .....	1863
18.3.6	Kugeltensor und Deviator .....	1864
18.3.7	Beispiele und Ergänzungen .....	1866
18.3.8	Festigkeitshypothese von HUBER-MISES-HENCKY für zähe Metalle .....	1870
18.4	<b>Experimente zur Problematik des Streckgrenzenansatzes</b> .....	1876
18.4.1	'Statische' Streckgrenze .....	1876
18.4.2	Elastisch-plastische Hysterese – BAUSCHINGER-Effekt .....	1880
18.4.3	Bruchbilder statischer Zugversuche .....	1882

18.5	<b>Bruchmechanik (Einführung)</b> .....	1882
18.5.1	Vorbemerkungen .....	1882
18.5.2	Rissöffnungsarten – Spannungsfaktor $K_{Ic}$ .....	1884
18.5.3	Risstheorie bei statischer Beanspruchung – Vorwiegend ruhende Beanspruchung .....	1891
18.5.4	Spannungsrissskorrosion .....	1899
18.5.5	Risstheorie bei dynamischer (zyklischer) Beanspruchung – Vorwiegend nicht ruhende Beanspruchung .....	1899
	<b>Literatur</b> .....	1907
	 <b>Service</b>	
	Stichwortverzeichnis .....	1913



# Werkstoff Stahl – Werkstoffeigenschaften – Werkstoffprüfung

*Markus Feldmann*

## Inhaltsverzeichnis

- 1.1      Stahlherstellung – 3**
- 1.2      Grundlagen der Metallkunde [4–9] – 8**
  - 1.2.1    Kristalle, Mischkristalle, Phasen – 9
  - 1.2.2    Aufbau der Legierungen – Zustandsschaubilder – 11
  - 1.2.3    Eisen-Kohlenstoff-Schaubild – 16
  - 1.2.4    Technologische Einstellung der Stahleigenschaften – 18
- 1.3      Werkstoffprüfung – Mechanische  
Eigenschaften [7–9] – 29**
  - 1.3.1    Materialhärte – 30
  - 1.3.2    Materialfestigkeit und -zähigkeit – 32
  - 1.3.3    Bauteilfestigkeit und Bauteilzähigkeit (Bauteilduktilität) – 47
  - 1.3.4    Ermüdungsfestigkeit (Dauerfestigkeit) [14, 15] – 60
  - 1.3.5    Kerbschlagzähigkeit – 90
- 1.4      Stähle für den Stahlbau – 92**
  - 1.4.1    Allgemeines – Bezeichnungssystem – 92
  - 1.4.2    Bezeichnungssystem für Baustähle (Lieferbedingungen) – 94
  - 1.4.3    Baustähle – DIN EN 10025 – 96
  - 1.4.4    Nichtrostende Stähle – DIN EN 10088 [28–31] – 102
  - 1.4.5    Druckbehälterstähle – DIN EN 10028 – 105
  - 1.4.6    Weitere Stahlsorten – 107
  - 1.4.7    Stahlguss [34–36] – 108

- 1.4.8 Eisenguss (Gusseisen) [37] – 108
- 1.4.9 Stahlerzeugnisse– Lieferformen – Begriffe – 110
- 1.5 Korrosion – Korrosionsschutz [6–9, 44, 45] – 113**
- 1.5.1 Elektrochemische Korrosion in der Atmosphäre – 113
- 1.5.2 Fertigungsbeschichtungen (FB) –  
Walzstahlkonservierung – 116
- 1.5.3 Korrosionsschutz durch Beschichtungen – 117
- 1.5.4 Korrosionsschutz durch metallische Überzüge – 120
- 1.5.5 Spannungsrisskorrosion und Schwingungsrisskorrosion – 125
- Literatur – 126**

Die Eisen- und Stahlindustrie ist mit ihren Hütten und Walzwerken eine der ältesten Industriebranchen. Rohstoffe sind Kohle, Koks, Erze und Schrott. Die deutschen Hütten führen jährlich ca. 42 Mio. t Erze ein, überwiegend aus Brasilien (56 %), Kanada (16 %) und Schweden (11 %). Die Produktion ist energieaufwendig. Die Produktivität konnte bei der Rohstahlerzeugung in den letzten 50 Jahren bedeutend gesteigert werden: 1960 wurden ca. 80 t, 2010 ca. 500 t je Beschäftigter produziert, mit 450 000 Beschäftigten im Jahre 1960 und 86 000 im Jahre 2015. Gefertigt und weiterverarbeitet werden Grund-, Qualitäts- und Edelstähle in großer Mannigfaltigkeit. Im Stahlbau wird überwiegend Baustahl, zunehmend auch Feinkornbaustahl mit höherer Festigkeit, eingesetzt.

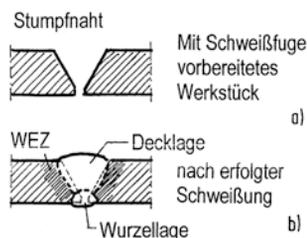
Die Sicherheit der Stahlkonstruktionen wird maßgeblich von der Erfüllung der Güteanforderungen an die verwendeten Stähle bestimmt. Das gilt insbesondere für geschweißte Bauteile: Beim Schweißen wird der Grundwerkstoff seitlich der Schweißfuge aufgeschmolzen und Schweißwerkstoff (Zusatzwerkstoff) in die Schweißfuge eingebracht. Grundwerkstoff und Schweißnaht kühlen anschließend mehr oder minder zügig ab. Schweißen bedeutet somit einen Eingriff in das Gefüge des Grundmaterials, insbesondere in die beidseitig der Naht liegenden Wärmeeinflusszonen (WEZ, ■ Abb. 1.1).

Das kann mit einer merklichen Änderung der mechanischen Eigenschaften des Grundmaterials einhergehen: Härte, Festigkeit, Zähigkeit, Riss- und Sprödbruchanfälligkeit sind in dem Zusammenhang wichtige Werkstoffkennwerte. Bei Lieferung, Prüfung, Abnahme und Verarbeitung der Produkte ist ein umfangreiches Normenwerk zu beachten: DIN-, DIN-EN- und DIN-EN-ISO-Normen und weitere nationale und europäische Richtlinien. Dem Stahlbau verwandt und zum Teil dazugehörig sind der Behälter- und Rohrleitungsbau, der Kranbau, der schwerer Fahrzeug- und Maschinenbau sowie der Schiffsbau.

## 1.1 Stahlherstellung

Stahl ist ein Eisenwerkstoff. Stahl wird aus Eisenerz erschmolzen. Das geschieht, in zwei Prozesslinien (■ Abb. 1.2); vgl. auch [1–3]:

- Im Hochofen wird aus den zuvor aufbereiteten Erzen (mit Koks als Energieträger) Roheisen erschmolzen (■ Abb. 1.2a). Das so gewonnene Roheisen weist einen hohen Anteil an Kohlenstoff (C) auf (in Höhe von 3–5 %), auch mehrprozentige Anteile von Schwefel (S) und Phosphor (P). Aus Roheisen wird anschließend im Konverter Rohstahl gewonnen. Das geschieht heutzutage praktisch



■ Abb. 1.1 Stumpfnahtrichterung mit Schweißnahtvorbereitung, Schweißnaht und Wärmeeinflusszone

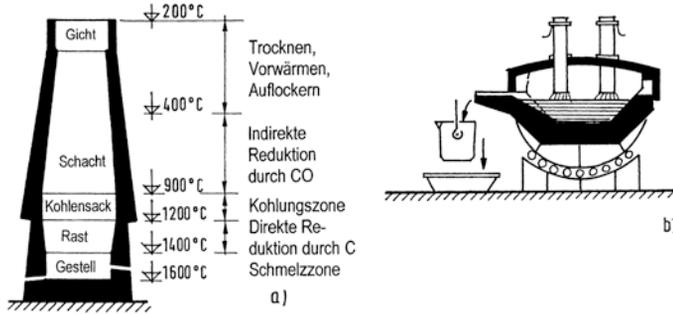


Abb. 1.2 Stahlherstellung im a) Hochofen-Verfahren und b) Elektrolichtbogen-Verfahren

ausschließlich durch Aufblasen von Sauerstoff auf das geschmolzene Roheisen (Sauerstoff-Blasverfahren), wobei Zuschlagstoffe hinzugefügt werden. Hierdurch gelingt es, den Kohlenstoff auf Restanteile zu reduzieren und die schädlichen Begleitelemente S und P weitgehend zu entfernen.

Für diverse Stahlsorten bedarf es einer weiteren pfannen-metallurgischen Behandlung durch Beigabe von Legierungselementen. Abb. 1.3a zeigt schematisch die Beschickung des Konverters mit Roheisen und Schrott, das Frischen mit der Sauerstofflanze und das Abgießen in Kokillen.

In der Frühzeit der Stahlerzeugung wurde das Roheisen im Flammenofen gefrischt, das Erzeugnis nannte man ‘Schweißeisen’, der Gehalt an Kohlenstoff lag i. A. über 0,4 %. Auch wegen des vergleichsweise hohen Schwefel- und Phosphorgehalts, zusätzlich mit Schlackeneinschlüssen, war dieser Werkstoff nicht schweißbar. Später wurde das Roheisen durch eingepresste Luft in der sog. Bessemer-Birne ‘gefrischt’, wiederum später gefolgt vom Windfrischen in der Thomas-Birne und dem Herdfrischen im Siemens-Martin-Ofen. Aus dem letztgenannten Verfahren ging ‘Flusseisen’ hervor, das man später Flussstahl nannte. Es besaß einen relativ hohen

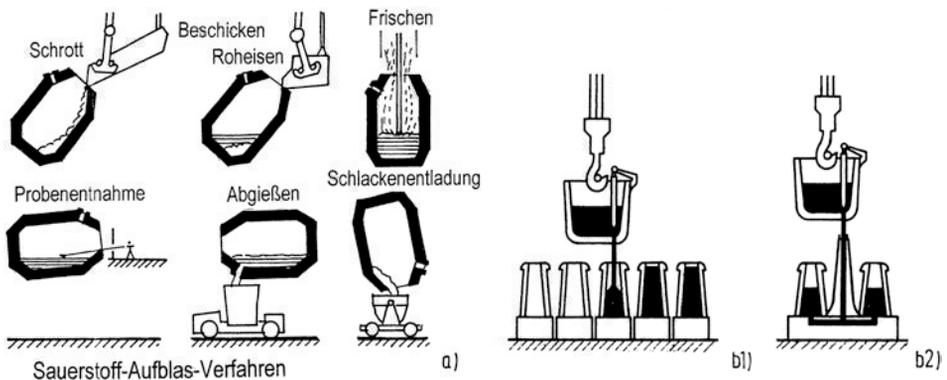


Abb. 1.3 Beschickung des Konverters mit Roheisen und Schrott, Frischen mit Sauerstofflanze und Abgießen in Kokillen

# MAURER

## MSM<sup>®</sup> Schwenktraversen-Dehnfugen

IZMIT BAY BRIDGE, IZMIT, TÜRKIE | 4. LÄNGSTE HÄNGEBRÜCKE DER WELT MIT HOHEN ERDBEBEN ANFORDERUNGEN



### Anwendung:

Der Einbau von MAURER Schwenktraversen soll die Hängebrücke befahrbar machen und im Falle eines Erdbebens vor horizontaler Überlast schützen.

### Vorteile:

- Uneingeschränkte Aufnahme der spezialisierten Bewegungen und gleichzeitige Übertragung von Verkehrslasten
- Überfahrbarkeit der Dehnfuge für Notfallfahrzeuge nach Erdbebenfall
- Überlastschutz des Brückendecks von zu großen Horizontalkräften
- Wartungsfreie Dehnfuge
- Langlebigkeit durch hohe Qualität der verwendeten Materialien
- Erdbebenverschiebung in Brückenlängsrichtung von ca. 4 m
- 10 x höhere Verschiebegeschwindigkeit im Servicebetrieb von bis zu 20 mm/sek
- Korrosionsschutz durch wasserdichte Mittelträgerverbindung

### Referenzen:

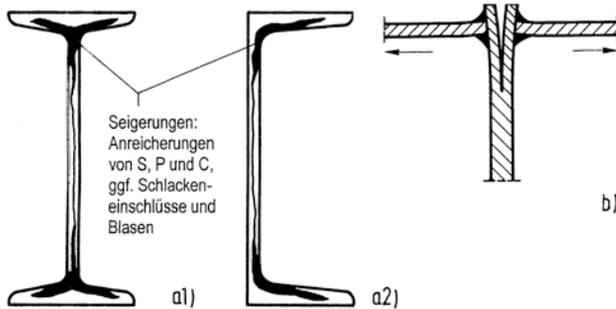
- Bahia de Cadiz, Spanien
- Hochmoselübergang, Deutschland
- Izmit Bay Bridge, Izmit, Türkei
- Mainbrücke Randersacker, Deutschland
- Rheinbrücke Schierstein, Deutschland
- Rion Antirion, Griechenland
- Ruskys Island Bridge, Wladiwostok, Russland
- Tsing Ma, China
- Viadukt Millau, Frankreich

Stickstoff- und Sauerstoffanteil. Beim Abkühlen in der Kokille (■ Abb. 1.3b), trat eine mehr oder minder starke Entmischung ein: Der Außenbereich des erstarrenden Blocks bestand aus weitgehend 'reinem' Stahl. Im später erkalteten Blockkern reicherten sich die flüchtigen Begleitelemente an. Man nennt diese mit Verunreinigungen (vorrangig mit S und P) angereicherte Zone 'Seigerung' und spricht von unberuhigtem Vergießen. Wird der Block ausgewalzt, findet sich diese Seigerungszone vielfach im Inneren des ausgewalzten Profils wieder (■ Abb. 1.4a). Bei Flacherzeugnissen kann das zu 'Dopplungen' führen, was eine Schwächung bei Zugbeanspruchung quer zum Blech zur Folge hat (■ Abb. 1.4b).

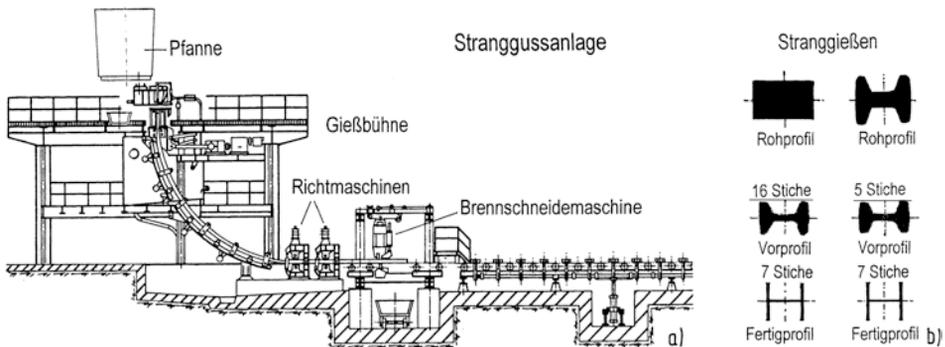
Bei der heutigen Stahlherzeugung besteht die geschilderte Seigerungsgefahr nicht mehr, da die Langprodukte überwiegend in Stranggussanlagen ihre Vorform erhalten, anschließend erhalten sie ihre Endform in wenigen Walzzügen (■ Abb. 1.5). Wegen seiner großen Wirtschaftlichkeit hat sich der Strangguss in wenigen Jahrzehnten gegenüber dem Blockguss durchgesetzt.

- Die zweite Prozesslinie der heutigen Herstellung von Rohstahl ist das Elektrolichtbogen-Verfahren (■ Abb. 1.2b). Der Ofen wird mit Schrott und Zuschlagstoffen beschickt.

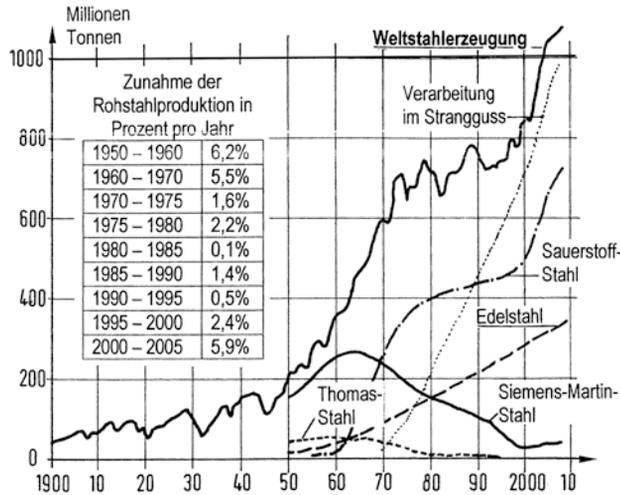
Stahl ist zu 100 % recycelbar. Ca. 50 % des heute weltweit erzeugten Stahls wird aus Schrott erschmolzen.



■ Abb. 1.4 Seigerungszone in der Stahlherzeugung von a) Profilstahl und b) Flacherzeugnissen



■ Abb. 1.5 Methode des Stranggussverfahrens



▣ Abb. 1.6 Überblick der weltweiten Walzstahlerzeugung

Auf die diversen Vergütungseingriffe bei der Stahlerzeugung wird in ► Abschn. 1.2.4 eingegangen. Dem Ziel einer hohen Güte der ausgelieferten Produkte und einer hohen Wirtschaftlichkeit dient eine umfassende Computersteuerung aller Prozesse (Erschmelzen, Frischen, Legieren, Vergießen, Walzen, fallweise Vergüten und Nachbehandlung). Die Verwendung höherfester Stähle und ein breites Sortiment an Stahlsorten liegen im Trend. Zudem werden im schweren Stahlbau immer größere Dicken der Grobbleche verarbeitet. ▣ Abb. 1.6 vermittelt einen Überblick über die weltweite Walzstahlerzeugung: Etwa zwei Drittel wird heute als Sauerstoffstahl bei Temperaturen zwischen 2000 bis 3000 °C im Hochofen und anschließend im Sauerstoff-Blasverfahren gefertigt, ein Drittel entsteht im Lichtbogenofen bei 3500 °C. Die weitere Fertigung des Vormaterials erfolgt zu ca. 90 % im Stranggussverfahren. Eine Weltproduktion von 1 Mrd. Tonnen Stahl bedeutet ein Volumen von  $\text{ca. } 10^9 / 7,85 = 0,13 \cdot 10^9 \text{ m}^3$ . Das ergibt einen Würfelblock mit  $\sqrt[3]{0,3 \cdot 10^9} \approx 500 \text{ m}$  Kantenlänge!

## 1.2 Grundlagen der Metallkunde [4–9]

Die mechanischen Eigenschaften sowie die Einflüsse und Maßnahmen, die eine Änderung derselben bewirken (Art der Erschmelzung und Vergießung, Legierung, Kaltverformung, Wärmebehandlung, Schweißung, Feuerverzinkung), lassen sich nur erklären und begreifen, wenn das Verhalten des atomaren Gitters und Korngütes unter diesen Einflüssen als auch unter den äußeren Einwirkungen (statische und dynamische Lasten, atmosphärische Einflüsse, Temperatur) betrachtet werden. Die hiermit zusammenhängenden Fragen sind vielfältig; sie gehören in das Gebiet der Baustoffkunde, speziell der in das Gebiet der Metallkunde; im Folgenden wird ein kurzer Abriss gegeben, der an den stahlbaulichen Belangen orientiert ist.

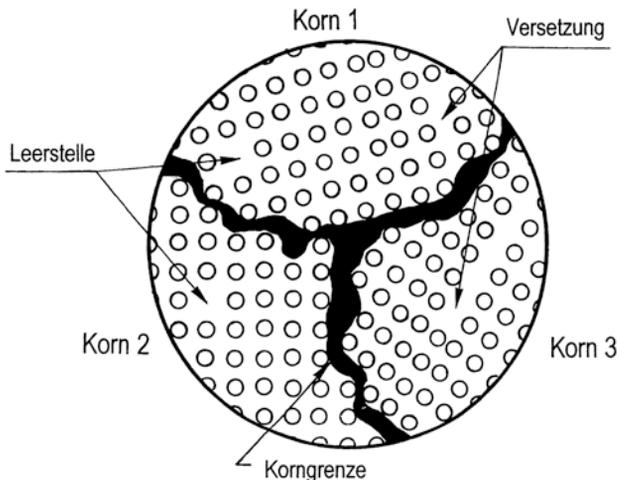
### 1.2.1 Kristalle, Mischkristalle, Phasen

Metalle und deren Legierungen haben einen kristallinen Aufbau. Bei Erhitzung geht der Aufbau bei einer bestimmten Temperatur aus dem Zustand fest in flüssige Schmelze über und umgekehrt: Beim Erstarren der Schmelze entwickeln sich die Kristalle, von vielen Kristallisationskeimen aus, zu Körnern (Kristalliten), bis sie entlang der Korngrenzen zusammenwachsen. Es entsteht ein vielkristallines Haufwerk (■ Abb. 1.7).

Innerhalb der Körner ist der Gitteraufbau (von Versetzungen abgesehen) streng. Der Abstand der Gitterpunkte, auf denen die Atome liegen, beträgt ca.  $3,0 \text{ \AA}$  ( $1 \text{ \AA} = 1 \text{ nm} = 10^{-7} \text{ mm}$ ); die Korngröße liegt in der Größenordnung 0,01 bis 1 mm.

Die Anziehungs- und Abstoßungskräfte der Atome befinden sich im Gleichgewicht, wobei sich die Atome auf den Gitterplätzen nicht in Ruhe, vielmehr in einem ‘Schwingungszustand’ befinden. Mit ansteigender Temperatur werden die Oszillationen der Atome intensiver, bei Erreichen der Schmelztemperatur bricht das Gitter auseinander. In der Schmelze befinden sich die Atome in einem ungeordneten Zustand: Flüssiger Aggregatzustand. Bei  $-273 \text{ °C}$  liegt der absolute Nullpunkt des kristallisierten Festzustandes. Die gute elektrische Leitfähigkeit der Metalle beruht auf den freien Elektronen im ‘Elektronengas’ zwischen den Metall-atomen.

Die regelmäßige Anordnung der Kristalle nennt man Raumgitter, deren kleinster Raumbereich Elementarzelle. Die meisten reinen Metalle kristallisieren im kubisch-raumzentrierten Gitter (z. B. Fe unterhalb  $906 \text{ °C}$ , Cr, Mo, W) oder im kubisch-flächenzentrierten Gitter (z. B. Fe oberhalb  $906 \text{ °C}$ , Al, Ni, Cu), vgl. ■ Abb. 1.8. Ein weiterer wichtiger Gittertyp ist der hexagonale: Zwischen den mit 7



■ Abb. 1.7 Vielkristallines Haufwerk mit Körnern (Kristalliten) und Korngrenzen