

S. Schwaigerer

Festigkeitsberechnung
im Dampfkessel-,
Behälter- und
Rohrleitungsbau

Dritte, neubearbeitete Auflage



Springer-Verlag
Berlin Heidelberg New York

TK 222
S 1
E 3

7967338

Siegfried Schwaigerer

Festigkeitsberechnung im Dampfkessel-, Behälter- und Rohrleitungsbau

Dritte, neubearbeitete Auflage

Mit 227 Abbildungen und 18 Tabellen



E7967338

Springer-Verlag
Berlin Heidelberg New York 1978



Dr.-Ing. SIEGFRIED SCHWAIGERER
Düsseldorf

Bisher erschienen unter dem Titel:
Festigkeitsberechnung von Bauelementen des Dampfkessel-, Behälter- und
Rohrleitungsbaues

ISBN 3-540-08745-1 3. Aufl. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York
ISBN 0-387-08745-1 3rd ed. Springer-Verlag New York Heidelberg Berlin

ISBN 3-540-05247-X 2. Aufl. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York
ISBN 0-387-05247-X 2nd ed. Springer-Verlag New York Heidelberg Berlin

CIP-Kurztitelaufnahme der Deutschen Bibliothek. Schwaigerer, Siegfried: Festigkeitsberechnung im Dampfkessel-, Behälter- und Rohrleitungsbau. – 3., neubearb. Aufl. – Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 1978.

Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdruckes, 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.

© by Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg 1961, 1970, and 1978.

Printed in Germany

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.

Gesamtherstellung: Graph. Betrieb Konrad Triltsch, Würzburg

2362/3020 – 543210

Festigkeitsberechnung im Dampfkessel-, Behälter- und Rohrleitungsbau



Vorwort zur dritten Auflage

Wie in den vorhergehenden Auflagen wurde an dem Grundgedanken festgehalten, dem Praktiker eine Arbeitshilfe zu geben, die es ihm ermöglicht, mit geringem Zeitaufwand, ohne Einsatz maschineller Hilfsmittel, die Abmessungen eines Bauteils so zu ermitteln, daß den Festigkeitsanforderungen Genüge getan wird. Dabei wurde besonderer Wert auf eine einfache, leicht verständliche, durch Versuchsergebnisse gestützte Darstellung gelegt.

In diesem Sinne wurden in die dritte Auflage die neuen Erkenntnisse der letzten Jahre eingearbeitet. Zum besseren Verständnis schien es auch angebracht, bisherige Ausführungen zu ergänzen und die Gedankengänge zu vertiefen. So wurden eingehende Betrachtungen zum Problem der Wechselfestigkeit angestellt und Vorschläge für die Berechnung solcher Teile gemacht. Ganz neu bearbeitet, insbesondere im Hinblick auf die Rohrböden bei Wärmetauschern, ist der Abschnitt über ebene Platten. Neu hinzugekommen ist ein Abschnitt über Wellrohr-Kompensatoren. Wesentliche Umarbeitung hat der Abschnitt Flanschverbindungen erfahren. Mit einer Reihe von Beispielen wurde der Berechnungsgang in einzelnen Abschnitten erläutert.

Düsseldorf, im Juli 1978

Siegfried Schwaigerer

Geleitwort zur ersten Auflage

Die deutschen Vorschriften und Richtlinien für die Berechnung von Dampfkesseln und Druckbehältern¹ beschränken sich bewußt auf die Wiedergabe der einfachen und kurzen Berechnungsformeln. Hinter diesen Formeln stehen jedoch die Ergebnisse wissenschaftlicher Untersuchungen und einer ausgedehnten laufenden Forschung, die immer wieder durch praktische Erfahrungen erhärtet und ergänzt bzw. auch korrigiert werden müssen. Es ist Herrn Dr. Schwaigerer dafür zu danken, daß er der Anregung des Deutschen Dampfkessel- und Druckgefäß-Ausschusses gefolgt ist und die theoretischen Grundlagen des deutschen Berechnungswerkes und die Entwicklung, die hierzu geführt hat, zusammenfassend niedergelegt hat. Als langjähriger Mitarbeiter von Herrn Professor Dr.-Ing. Erich Siebel war er wohl dazu berufen, die Siebelschen Ideen darzulegen, die dem Deutschen Dampfkessel- und Druckgefäß-Ausschuß in besonderem Maße als Richtschnur für seine Arbeiten in den beiden letzten Jahrzehnten gedient haben.

¹ Dampfkessel-Bestimmungen, Technische Regeln für Dampfkessel Teil „Berechnung“ und AD-Merkblätter „Berechnung von Druckbehältern“. Bezug: Carl Heymanns Verlag KG., Köln 1, Gereonstraße 18 – 32, und Beuth-Vertrieb GmbH., Köln, Friesenplatz 16.

Die Ausführungen von Herrn Dr. Schwaigerer bieten nicht nur die theoretische Grundlage und Bestätigung für die zur Zeit geltenden und zum Teil noch im Entwurf vorliegenden Berechnungsregeln, sondern zudem auch eine wünschenswerte sachliche Kritik und Vorschläge für die weitere Entwicklung und Ergänzung. Die Technik des Dampfkessel- und Druckgefäßbaues ist noch in ständigem Fluß. Die Bestrebungen und Vorschläge für eine Regelung auf internationaler Ebene verdienen dabei besondere Beachtung. Deshalb ist die vorliegende Zusammenstellung nicht nur als Grundlage für die derzeitig geltenden Vorschriften und Richtlinien zu begrüßen, sondern darf auch als Ausgangspunkt für deren weitere Entwicklung angesehen werden. Entscheidend dabei muß immer wieder die praktische Bewährung bleiben, über die uns die Schadensstatistik Antwort gibt, und die letzten Endes auch die Übereinstimmung von Theorie und Praxis bestätigt.

Dem Buch wird ein voller Erfolg gewünscht. Es gehört in die Hand jedes Ingenieurs, der mit der Sicherheit von Dampfkesseln und Druckbehältern zu tun hat.

Deutscher Dampfkessel- und Druckgefäß-Ausschuß

Vorwort zur ersten Auflage

Eingeleitet durch die Arbeiten von C. Bach haben die deutschen Berechnungsvorschriften für Dampfkessel, Behälter und Rohrleitungen, wie sie in den Dampfkesselbestimmungen, in den AD-Merkblättern und in den einschlägigen Normen verankert sind, eine führende Stellung in der Fachwelt erlangt. Es hat vieler Kleinarbeit, Untersuchungen und Aussprachen in den Fachgremien bedurft, um zu den heutigen in knapper Form vorliegenden Fassungen zu gelangen.

An der Seite meines hochverehrten Lehrers, E. Siebel, durfte ich an dieser großen Arbeit teilnehmen. So bin ich auch gern der Aufforderung aus Fachkreisen nachgekommen, einmal die Überlegungen und Gedanken, die zu den verschiedenen Berechnungsformeln geführt haben, in geschlossener Form darzustellen. Es ist nahelegend, daß die eingehende Durcharbeitung des Stoffes an der einen oder anderen Stelle eine Ergänzung oder einen Verbesserungsvorschlag entstehen ließ, der hiermit zur Diskussion gestellt sei. Der Zweck des vorliegenden Buches scheint mir erfüllt, wenn es denen, die sich mit Festigkeitsrechnungen befassen müssen, eine Hilfe sein wird und zur weiteren Entwicklung Anregungen gibt.

Dem Springer-Verlag habe ich für die Ausstattung sowie die sorgfältige Herstellung von Satz und Abbildungen zu danken.

Düsseldorf, im März 1961

Siegfried Schwaigerer

Bezeichnungen *

a	Abstand, Hebelarm, Seitenlänge, Halbachse (mm)	P	Bezeichnung eines Punktes (-)
a_g	Temperaturleitfähigkeit (mm ² /s)	Q	Querkraft (N)
b	Breite (mm)	\bar{S}	Sicherheitsbeiwert (-)
c	konstanter Zuschlag (mm)	U	Unrundheit (%)
d	Durchmesser (mm)	VS	Vorspannung (%)
e	Abstand (mm)	W	Widerstands-Moment (mm ³)
$f(\)$	Funktion	Z	Zeitabschnitt (s)
h	Höhe, Dicke (mm)	α	Formzahl (-)
i	unbestimmte Zahl (-)	α_g	Wärme-Übergangszahl (J/mm ² · s · °C)
k	Faktor, Beiwert (-)	β	Berechnungsbeiwert (-)
l	Länge (mm)	β_K	Kerbwirkungszahl (-)
m	Beiwert (-)	β_g	Thermischer Längendehnungskoeffizient (1/°C)
n	Anzahl (-)	δ_s	Bruchdehnung (%)
p	Druck, Flächenpressung (N/mm ²)	δ_ε	Dehngrenzenverhältnis (-)
q	Linien-Belastung (N/mm)	δ_W	Stützfaktor bei Wechselbeanspruchung (-)
q_g	Wärmedurchgang (J/mm ² s)	ε	Dehnung (%)
r	Radius (mm)	η_K	Kerbempfindlichkeit (-)
s	Wanddicke, ohne Zuschlag (mm)	ϑ	Temperatur (°C)
\underline{s}	Wanddicke, mit Zuschlägen (mm)	κ	Oberflächen-Faktor (-)
t	Teilungsabstand (mm)	λ_B	Rohrbogen-Faktor (-)
v	Verschwächungsbeiwert, Schweißnahtfaktor (-)	λ_g	Wärmeleitzahl (J/mm · s · °C)
v_g	Temperaturänderungs-Geschwindigkeit (°C/s)	μ	Reibungszahl (-)
w	Durchwölbung, Wellentiefe (mm)	ν	Querzahl (-)
x, y, z	Koordinaten (mm)	σ	Normalspannung (N/mm ²)
A	Querschnittsfläche (mm ²)		Werkstoff-Festigkeitswert (N/mm ²)
B	Berechnungsbeiwert (-)	τ	Schubspannung (N/mm ²)
C	Konstante	φ	Winkel (°)
E	Elastizitätsmodul (N/mm ²)	χ	Bezogenes Spannungsgefälle (1/mm)
F	Einzelkraft (N)	ψ	Winkel (°)
H_i	Häufigkeit (-)	ψ_B	Bruch-Einschnürung (%)
I	Flächenträgheitsmoment (mm ⁴)	Δ	Zuwachs, Differenz
K	Werkstoff-Festigkeitswert, allgemein (N/mm ²)		
M	Moment (N · mm)		
M'	Moment pro Längeneinheit (N · mm/mm)		
N	Platten-Steifigkeit (N · mm)		
		<i>Fußzeiger</i>	
		a	außen, Amplitude
		b	Biegung

* Der Verfasser hat sich bemüht, bei der Wahl der Bezeichnungen eine gewisse Systematik walten zu lassen, z. B. sind alle Längenabmessungen nur mit kleinen lateinischen Buchstaben bezeichnet. Soweit möglich, werden die in DIN 1304 aufgeführten Formelzeichen verwendet, aber auch an altgewohnten Zeichen festgehalten. Als Einheiten werden nur „mm, N, s, J und °C“ benutzt.

<i>d</i>	Druck
<i>i</i>	innen
<i>l</i>	längs, axial
<i>m</i>	mittlere (– Beanspruchung)
<i>n</i>	für die Anzahl <i>n</i> geltend
<i>o</i>	oben
<i>p</i>	Innendruck, pulsierend
<i>r</i>	radial
<i>t</i>	tangential
<i>u</i>	unten
<i>x, y</i>	an der Stelle <i>x, y</i>
<i>z</i>	Zug
zul	zulässig
<i>A</i>	Ausschnitt, Ansatz
<i>B</i>	Bruch, Boden, Betrieb
<i>D</i>	Dichtung
<i>E</i>	Eigen-(Spannung)
<i>F</i>	Fließen, Flansch (Fl)
<i>H</i>	horizontal

<i>K</i>	Knicken, Kerbe, Krempe, Kante, Kompensator
<i>L</i>	Loch, Bohrung
<i>M</i>	Meridian, Moment
<i>N</i>	Nenn-(Spannung)
<i>R</i>	Rohr, Ring
<i>S</i>	Schraube
<i>Sch</i>	Schwell-(Festigkeit)
<i>U</i>	Umfang
<i>V</i>	Vergleichs-(Spannung), vertikal
<i>W</i>	Wechsel-(Festigkeit), Wölbung
ϑ	bei der Temperatur ϑ

Kopfzeiger

–	Mittelwert
∧	Maximalwert
∨	Minimalwert
*	fiktiver Wert

Inhaltsverzeichnis

Bezeichnungen	IX
Einleitung	1
1 Grundsätzliche Betrachtungen zur Festigkeitsberechnung	2
1.1 Festigkeitsbedingungen	2
1.2 Spannungszustand	3
1.3 Werkstoff-Kennwerte	6
1.4 Sicherheitsbeiwerte und Zuschläge	9
1.5 Festigkeitshypothesen	14
1.6 Festigkeitsrechnung bei ungleichförmiger ruhender Beanspruchung	17
1.7 Eigenspannungen	21
1.8 Festigkeitsrechnung bei wechselnder Beanspruchung	22
1.8.1 Dauer-Wechselfestigkeit	23
1.8.2 Zeit-Wechselfestigkeit	27
1.9 Grundformen	39
2 Zylindrische Schalen unter innerem Überdruck	42
2.1 Die Beanspruchung in Zylinder-Schalen unter Innendruck	42
2.2 Zylinder-Schalen mit Schweißnaht	53
2.3 Zylinder-Schalen mit Lochfeldern	54
2.4 Zylinder-Schalen mit Ausschnitten	61
2.5 Unrunde Zylinder-Schalen	79
3 Rohrbogen	82
3.1 Beanspruchung durch den Innendruck	82
3.2 Beanspruchung durch ein Biegemoment	85
3.3 Beanspruchung durch überlagerte Innendruck- und Biegebeanspruchung	89
3.4 Rohrbogen bei wechselnder Beanspruchung	89
4 Zylindrische Schalen unter äußerem Überdruck (Flammrohre)	93
4.1 Dickwandige Hohlzylinder unter Außendruck	93
4.2 Das Einbeulen kreisrunder Zylinder-Schalen	94
4.3 Das Einbeulen unrunder Zylinder-Schalen	96
4.4 Die Längssteifigkeit von Flammrohren	100

5 Kugel-Schalen	101
5.1 Die Beanspruchung in Kugel-Schalen unter Innendruck	101
5.2 Kugel-Schalen mit Ausschnitten	103
6 Gewölbte Böden unter innerem und äußerem Überdruck	111
6.1 Vollböden	111
6.2 Mannloch-Böden	116
6.3 Die Verstärkung von Ausschnitten	122
6.4 Das Unstabilwerden von gewölbten Böden	122
7 Flammrohr-Böden	125
7.1 Ebene Flammrohr-Böden	126
7.2 Tiefgewölbte Flammrohr-Böden	126
7.3 Flachgewölbte Flammrohr-Böden	127
8 Kegelförmige Böden	129
9 Ebene Platten	136
9.1 Kreisförmige Platten	136
9.2 Rohrplatten in Wärmetauschern	144
9.3 Ebene Böden mit Entlastungsnut	152
9.4 Rechteckige und elliptische Platten	154
9.5 Verankerte ebene Platten	155
10 Vierkant-Rohre	158
11 Wellrohr-Kompensatoren	163
11.1 Beanspruchung durch den Innendruck	164
11.2 Beanspruchung durch Längenänderungen	166
11.3 Wechselfestigkeit	170
12 Flanschverbindungen	173
12.1 Die Kraft-Verformungs-Verhältnisse	173
12.2 Die äußeren Kräfte	174
12.3 Dichtungsvorgang und Dichtungskräfte	176
12.4 Berechnung der Schrauben	181
12.5 Die Flanschbeanspruchung	182
12.6 Das Verspannungs-Schaubild	189
12.7 Entlastete Flansche	193
12.8 Flansche aus wenig verformungsfähigen Werkstoffen	195
13 Teller-Böden	197
13.1 Die Beanspruchung des Flansches	198
13.2 Die Beanspruchung der Kugel-Schale	199
14 Wärmespannungen	202
Sachverzeichnis	208

Einleitung

Vorschriften bzw. Richtlinien für die Festigkeitsberechnung der Bauelemente des Dampfkessel-, Behälter- und Rohrleitungsbaus sind in den Technischen Regeln (TRD) für Dampfkessel, in den Merkblättern der „Arbeitsgemeinschaft Druckbehälter“ (AD-Merkblätter) und in den einschlägigen DIN-Normblättern gemacht. Die darin verwendeten Berechnungsformeln entsprechen den neuesten Erkenntnissen von Technik und Forschung und gelten als Regeln der Technik. Richtschnur bei der Festlegung der Berechnungsgänge war, möglichst einfache Formeln zu finden, die den Benutzer mit geringstem Zeitaufwand zu einem sicheren Ergebnis führen. Dabei stellen diese Berechnungsformeln trotz ihrer einfachen Gestalt den Extrakt aus umfangreichen Überlegungen und Forschungsarbeiten dar.

Bei der Aufstellung dieser Formeln war man bestrebt, stets von einem rechnerisch exakten Ansatz auszugehen. Wenn der Rechnungsweg zu schwierig wurde oder zu einem für den Praktiker schwer zu handhabenden Ergebnis führte, hat man Näherungslösungen gesucht, deren Brauchbarkeit in einer Vielzahl von Versuchen nachgeprüft wurde. Durch umfangreiche Messungen gewonnene Ergebnisse wurden in Form von Kurventafeln zur Darstellung gebracht. Die folgenden Ausführungen sollen die wesentlichsten Überlegungen wiedergeben, die bei der Festlegung der oben zitierten Rechnungsvorschriften angestellt worden sind und so das Verständnis beim Benutzer vertiefen. Auch noch offenstehende Fragen werden im folgenden angeschnitten und Lösungsvorschläge gemacht.

Dabei wurde bewußt darauf verzichtet, die im Schrifttum bekannten elastizitätstheoretischen Ableitungen der Formeln wiederzugeben. Dagegen erschien es angebracht, kurz auf die Grundbegriffe der Werkstoffmechanik einzugehen, soweit dies für die Beurteilung des Festigkeitsverhaltens eines Bauteiles erforderlich schien. Besonderer Wert wurde darauf gelegt, das Festigkeitsverhalten der Bauteile auch bei überelastischer Beanspruchung zu verfolgen, da die verformungsfähigen Werkstoffe Spannungsspitzen durch örtliches Fließen abbauen und somit die Tragfähigkeit bei ruhender Belastung erheblich höher liegen kann, als es auf Grund rein elastizitätstheoretischer Betrachtungen zu erwarten wäre. Weiterhin wurden auch die umfangreichen, in den letzten Jahren gewonnenen Forschungsergebnisse an Bauteilen unter wechselnder Belastung mit in Betracht gezogen.

1 Grundsätzliche Betrachtungen zur Festigkeitsberechnung

1.1 Festigkeitsbedingungen

Bei der Festigkeitsbetrachtung eines Konstruktionsteils muß stets die Festigkeitsbedingung

$$\hat{\sigma}_V = \frac{K}{S} \quad (1.1)$$

erfüllt sein, d. h. in Worten, es ist so zu dimensionieren, daß die an der höchst beanspruchten Stelle (gefährdeter Querschnitt) herrschende Anstrengung oder Vergleichsspannung $\hat{\sigma}_V$ mit einer bestimmten Sicherheit S unter dem in Betracht kommenden Werkstoff-Festigkeitskennwert K bleibt. Dabei kann die Rechnung gegen Versagen durch unzulässig große Verformung bei kurzzeitiger oder langzeitiger Belastung wie durch Bruch des Bauteils bei einmaliger (ruhender) oder oft wiederholter Belastung durchgeführt werden. Besteht die Möglichkeit des Unstabilwerdens, z. B. durch Knicken oder Einbeulen, so muß auch dieser Fall in die Festigkeitsbetrachtung einbezogen werden.

Bei der Ermittlung der größten Anstrengung $\hat{\sigma}_V$ ist zu beachten, daß die aus verschiedenartigen Belastungen resultierenden Spannungen nicht immer gleichwertig sind und unbedenklich überlagert, d. h. vektoriell addiert werden können. So wird z. B. der Innendruck zum Versagen eines Rohres führen, wenn die Anstrengung einen bestimmten Festigkeitswert überschreitet. Dagegen wird eine Anstrengung von gleicher Größe, die beispielsweise bei der Wärmedehnung eines zwischen zwei Festpunkten eingespannten Rohrstranges entsteht, bei einem verformungsfähigen Werkstoff nach Überschreiten des elastisch ertragbaren Grenzwertes lediglich zu einer plastischen Verformung führen. Solche Verformungen erträgt der Werkstoff ohne Schädigung, wenn die Zahl der Verformungswechsel gering bleibt. Sie können jedoch zur Werkstoffermüdung führen, wenn die Zahl der Wechsel eine bestimmte Größe übersteigt.

Man hat also bei der Festigkeitsbetrachtung zwei Arten von Beanspruchungen zu unterscheiden, und zwar solche 1. Ordnung, die durch eine äußere Belastung hervorgerufen werden und solche 2. Ordnung, die bei einer aufgezwungenen Verformung entstehen, wobei für die Bemessung der Wanddicke nur die Beanspruchungen 1. Ordnung maßgebend sind. Die Beanspruchungen 2. Ordnung, die vielfach in mehr oder weniger regelmäßiger Folge auftreten, sind im Hinblick auf die Möglichkeit einer Werkstoff-Ermüdung zu beachten.

Hinsichtlich der Gefahr des Versagens unter ruhender Belastung wird man bei verformungsfähigen Werkstoffen auch einen Unterschied machen, je nachdem, ob in einem Querschnitt eine Zug- oder Biegebeanspruchung herrscht. Im ersten Falle kann es, wenn die Beanspruchung einen bestimmten Grenzwert überschreitet, zum

Bruch oder mindestens zu einer so großen Verformung kommen, daß das Bauteil unbrauchbar wird, während im zweiten Falle nur eine begrenzte Verformung auftritt, die der Betriebsfähigkeit keinen Abbruch tun muß. Man kann sich das klar machen, wenn man z. B. ein Rohr und eine ebene Platte betrachtet, die beide unter Überdruck stehen. Das Rohr wird, sobald der Druck eine bestimmte Größe erreicht hat, haltlos wegfließen und schließlich zu Bruch gehen, während die Platte noch einen erheblich höheren Druck ertragen kann als den, bei dem das Fließen einsetzt. Zudem verläuft bei biegebeanspruchten Bauteilen die Verformung meist so, daß das Bauteil in eine spannungsmäßig gesehen günstigere Gestalt übergeht. So wird beispielsweise ein unter Überdruck stehender, ebener Boden, wenn er über die Biegestreckgrenze belastet wird, beginnen sich auszuwölben, wodurch er imstande ist, eine erheblich höhere Belastung aufzunehmen.

Man sollte diese Erkenntnis im Auge behalten bei der Auswertung von Dehnungsmessungen insofern, als die gefährdete Stelle eines Bauteils nicht unbedingt dort liegen muß, wo die größte Biegedehnung gemessen wird. Wie aber bereits eingangs gesagt, gelten diese Überlegungen nur, wenn der Werkstoff ausreichendes Verformungsvermögen besitzt und die Gefahr einer Werkstoffermüdung durch häufig wiederkehrende Belastungswechsel ausgeschlossen ist.

Entsprechend der Art der Festigkeitsrechnung müssen Werkstoffkennwert K und Sicherheitsbeiwert S gewählt werden. Es erweist sich in vielen Fällen als erforderlich, die Rechnung mehrfach nach den verschiedenen möglichen Arten des Versagens durchzuführen und die Bemessung des Bauteils so vorzunehmen, daß es der größten jeweils errechneten Beanspruchung standhält. In den eingangs angeführten Vorschriften wurde angestrebt, nach Möglichkeit die Berechnungsformeln so aufzustellen, daß die Hauptabmessung des Bauteils, z. B. die Wanddicke, unmittelbar berechnet werden kann. In Fällen, in denen der Rechnungsgang zu umständlich wurde, erschien es zweckmäßiger, die zulässige Beanspruchung oder die zulässige Belastung auf Grund der angenommenen Abmessungen zu errechnen. Dabei muß u. U. die Rechnung mit verschiedenen Abmessungen mehrmals wiederholt werden, bis die richtige Abmessung, die den vorgegebenen Bedingungen entspricht, ermittelt ist.

1.2 Spannungszustand

Bei den Bauteilen des Dampfkessel-, Behälter- und Rohrleitungsbaus hat man es in der Regel mit schalen- oder plattenförmigen Körpern zu tun, die vorwiegend einer Innen- oder Außendruckbelastung ausgesetzt sind. Unter der Einwirkung der äußeren Belastung treten in der Wandung Kraftwirkungen wie Normalkräfte, Schubkräfte, Biegemomente oder Verdrehmomente auf.

Die Kraftwirkungen rufen in der Wandung Verformungen hervor, derart, daß z. B. ein würfelförmiges Element, das man sich im unbelasteten Zustand an einer Stelle der Wandung abgegrenzt vorstellt, unter der Belastung Längenänderungen der Kanten und Winkeländerungen der rechten Winkel, den die Kanten miteinander bilden, erleidet. Gleichzeitig mit der Verformung treten innere Kräfte, sogenannte Spannungen auf, die die Verformung rückgängig zu machen suchen.

Ein Verformungszustand wird als rein elastisch bezeichnet, wenn die Verformung nach Wegnahme der Belastung auf null zurückgeht. Verformung ε und Span-

nung σ sind im elastischen Zustand einander proportional, entsprechend der Beziehung $\sigma = E \cdot \varepsilon$, wobei E als Elastizitäts-Modul bezeichnet wird. Die Ermittlung der elastischen Spannungen bzw. Dehnungen in Bauteilen ist Aufgabe der Elastizitätslehre. Dabei wird außer der Annahme vollkommener Elastizität noch die Voraussetzung der Isotropie, d. h. der Gleichheit des Verformungsverhaltens in den drei Koordinaten-Richtungen, gemacht, was bei vielkristallinen Werkstoffen weitgehend der Fall ist.

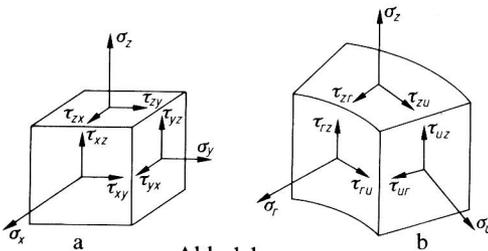


Abb. 1.1

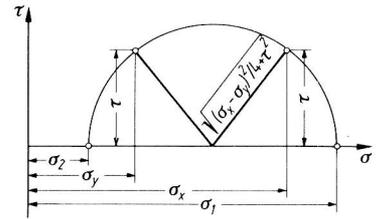


Abb. 1.2

Abb. 1.1 a u. b Körperelemente mit Spannungskomponenten. a) Rechtwinklige Koordinaten; b) Zylinder-Koordinaten

Abb. 1.2 Mohrscher Spannungskreis

Je nach Art der Kraftwirkungen und Gestalt des Bauteils bildet sich in der Wandung ein bestimmter Spannungszustand aus. Dabei ist es üblich, die Spannungen in Komponenten zu zerlegen, die in Richtung der Koordinaten eines dem Bauteil zugeordneten Koordinatensystems weisen. Zweckmäßigerweise wählt man dabei ein solches Koordinatensystem, in dem sich die Gestalt des Bauteils am einfachsten beschreiben läßt, z. B. für eine quaderförmige Gestalt rechtwinklige, für eine zylinderförmige Gestalt aber Zylinder-Koordinaten, wie in *Abb. 1.1 a und b* dargestellt.

An einem Körperelement gemäß *Abb. 1.1* können an jeder Schnittfläche eine senkrecht stehende, die sogenannte Normalspannung σ und zwei in der Schnittebene liegende Komponenten, die sogenannten Schubspannungen τ , auftreten. Der Spannungszustand in jedem Punkt ist also eindeutig beschrieben durch neun bzw. sechs Spannungskomponenten, da ja jeweils die beiden gegeneinander gerichteten Schubspannungen aus Gleichgewichtsgründen von gleicher Größe sein müssen.

Unter den vielen denkbaren Schnittrichtungen, unter denen man sich das Körperelement herausgeschnitten vorstellen kann, ist eine bestimmte Lage dadurch ausgezeichnet, daß die Schubspannungen verschwinden und die Normalspannungen Größt- und Kleinstwerte annehmen. Man bezeichnet diese Normalspannungen als Hauptspannungen, $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$.

Treten in einer Koordinatenrichtung keine Spannungen auf, so spricht man von einem zweiachsigen Spannungszustand. Ein solcher herrscht z. B. an der Bauteiloberfläche, sofern diese nicht durch Querkräfte belastet ist. Den Zusammenhang zwischen Normal-, Schub- und Hauptspannungen kann man sich für den zweiachsigen Spannungszustand anhand des Mohr'schen Spannungskreises veranschaulichen. Dabei werden, wie in *Abb. 1.2*, in einem rechtwinkligen Koordinatensystem die Normalspannungen σ_x und σ_y auf der Abszisse und die Schubspannungen τ auf der Or-

dinate abgetragen. Der Kreismittelpunkt liegt dann bei $(\sigma_x + \sigma_y)/2$, während der Radius den Betrag $r = \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2/4 + \tau^2}$ hat. Die Schnittpunkte des Kreises mit der Abszisse ($\tau = 0$) liefern die Hauptspannungen mit

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau^2}, \quad \sigma_2 = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau^2}. \quad (1.2)$$

Für eine Reihe von einfach gestalteten Bauteilen können die elastischen Spannungen ihrer Größe und ihrem Verlauf nach berechnet werden. In vielen Fällen ist jedoch die Rechnung nicht oder nur mit großem zeitlichen bzw. maschinellen Aufwand durchzuführen. In solchen Fällen kann man sich durch Dehnungsmessungen ein Bild über den Spannungszustand machen¹. Unter einer großen Zahl von Meßverfahren² wird heute vorwiegend das Messen mit Dehnungs-Meßstreifen vorgenommen, die auf das Bauteil aufgeklebt werden und sowohl bei ruhender wie bei schnell wechselnder Belastung geeignet sind.

Die Spannungen lassen sich aus den in x - und y -Richtung gemessenen Dehnungen ε_x und ε_y berechnen zu

$$\sigma_x = \frac{E}{1 - \nu^2} (\varepsilon_x + \nu \varepsilon_y); \quad (1.3 a)$$

$$\sigma_y = \frac{E}{1 - \nu^2} (\varepsilon_y + \nu \varepsilon_x). \quad (1.3 b)$$

Sind die Spannungen über einen betrachteten Querschnitt von gleicher Größe, z. B. bei einem Zugstab, so nennt man den Spannungszustand gleichförmig, zum Unterschied vom ungleichförmigen Spannungszustand, bei dem die Größe der Spannungen sich von Punkt zu Punkt ändert. Es ist üblich, ungleichförmige Spannungszustände durch Formzahlen zu kennzeichnen. Die Formzahl α gibt an, um das Wievielfache der elastizitätstheoretisch errechnete oder gemessene Spannungshöchstwert $\hat{\sigma}$ über einer im Querschnitt gleichförmig verteilt gedachten Mittelspannung $\bar{\sigma}$ liegt. Der Begriff der Formzahl stammt ursprünglich aus der Kerbspannungslehre, wo die Spannungsspitze im Kerbgrund auf die Mittelspannung bezogen wird, die sich besonders einfach, z. B. beim Zugstab, mit dem Kerbquerschnitt A_K , der mit der Zugkraft F belastet wird, als $\bar{\sigma} = F/A_K$ ergibt.

Bei gekerbten Biegestäben wird gewöhnlich die Höchstspannung im Kerbgrund auf die Nennspannung $\sigma_N = M_b/W$ bezogen, das ist die Biegespannung unter dem Biegemoment M_b in der Außenfaser eines ungekerbten Balkens mit dem Widerstandsmoment W des Kerbquerschnitts. Das bedeutet aber, daß die Formzahl in diesem Falle nicht die wirkliche Ungleichförmigkeit des Spannungszustandes kennzeichnet, da die Biegespannung an sich ja schon einen ungleichförmigen Verlauf vom Wert $+\sigma_N$ in der Zugzone auf den Wert $-\sigma_N$ in der Druckzone nimmt. Die wirkliche Ungleichförmigkeit kommt jedoch zum Ausdruck, wenn man mit der Mittelspannung in der Zug- bzw. Druckzone $\bar{\sigma} = M_b/A_K \cdot 2a$ arbeitet, wobei a den Ab-

¹ Schwaigerer, S.: Experimentelle Ermittlung der Spannungen in Bauteilen. Z. VDI 94 (1952) 1025.

² Huggenberger, A. U., Schwaigerer, S.: Meßverfahren und Meßeinrichtungen für Verformungsmessungen. Aus: Handbuch der Werkstoffprüfung. Hrsg. E. Siebel u. N. Ludwig. Berlin, Göttingen, Heidelberg: Springer 1958.

stand des Schwerpunktes der Zug- oder Druckzone von der neutralen Achse bedeutet. Für einen Rechteck-Biegebalken (Höhe h , Breite b) mit $A_K = b \cdot h$ und $a = h/4$ ergibt sich $\bar{\sigma} = M_b \cdot 4 / h^2 \cdot b$ und die Formzahl des ungekerbten Balkens $\alpha = \sigma_N / \bar{\sigma} = 1,5$.

Bei einer Reihe von Bauteilen, z. B. Schalen mit unstetiger Meridian-Krümmung (gewölbte Böden), bei denen sich die Mittelspannung nicht in so einfacher Weise wie oben angeben läßt, kann man als Nennspannung einen Spannungswert festlegen, der proportional mit der Belastung (Innendruck p) und den Hauptabmessungen, wie Durchmesser d und Wanddicke s sich ändert. So wählt man beispielsweise bei gewölbten Böden als Nennspannung die Mittelspannung in einer Kugelschale $\sigma_N = p \cdot d / 4s$. Die Formzahl ist dann $\alpha = \hat{\sigma} / \sigma_N$.

1.3 Werkstoff-Kennwerte

Die Werkstoffe sind in der Lage, Spannungen bestimmter Größe aufzunehmen. Überschreiten die Spannungen eine für den Werkstoff charakteristische Größe, so kann es zum Bruch kommen oder aber zum plastischen Verformen, d. h. zum Fließen des Werkstoffs. Die im Kesselbau verwendeten Werkstoffe sind in der Mehrzahl verformungsfähig, d. h., sie sind in der Lage, plastische Verformungen aufzunehmen, die ein Vielfaches der elastisch ertragenen ausmachen. Das bedeutet aber auch, daß Spannungsspitzen im Querschnitt durch Fließen abgebaut werden können. Von dieser Tatsache macht man bei der Festigkeitsbetrachtung weitgehend Gebrauch, wie noch im folgenden gezeigt wird.

Bei der Festigkeitsrechnung im Kessel-, Behälter- und Rohrleitungsbau geht man normalerweise von der Voraussetzung aus, daß die Bauteile vorwiegend einer ruhenden Belastung unterworfen sind. Man unterstellt dabei, daß die Lastwechsel, die im Betrieb z. B. beim An- und Abfahren einer Anlage auftreten, in der Regel zahlenmäßig gering sind, und der Werkstoff diese Lastwechsel ohne Schädigung erträgt. Schadensfälle³, die in den letzten Jahren an Kesseltrommeln und Sammlern aufgetreten sind, haben jedoch gezeigt, daß besonders bei ungleichförmig beanspruchten Bauteilen das Wechselfestigkeitsverhalten mit in Betracht gezogen werden muß. Dabei erfährt die Wechselfestigkeit eine erhebliche Abminderung, wenn zusätzlich noch Korrosion auftritt.

An die im Kesselbau verwendeten metallischen Werkstoffe werden besondere Anforderungen bezüglich Festigkeit und Verformbarkeit gestellt, wobei vor allem auch das Verhalten bei höheren Temperaturen ins Auge zu fassen ist. Zahlenmäßig wird das Werkstoffverhalten durch Festigkeits- und durch Verformungskennwerte zum Ausdruck gebracht. Die Kennwerte für ruhende Belastung sind an Probestäben unter einachsiger ruhender oder allmählich gesteigerter Zugbelastung ermittelt, und zwar bei der Temperatur, die im Betrieb zu erwarten ist. Bekanntlich wird der Verformungswiderstand mit steigender Temperatur in immer stärkerem Maße zeitabhängig, d. h., die Verformung nimmt unter einer aufgegebenen konstanten Belastung im Laufe der Zeit zu, der Werkstoff kriecht.

³ Schoch, W.: Bericht über die aufgetretenen Schäden an Kesseltrommeln. Mitt. VGB 101 (1966) 70.

Als maßgebende Festigkeitswerte ⁴ werden bei der Berechnung von ruhend beanspruchten Bauteilen in der Regel zugrunde gelegt:

a) Die Fließgrenze σ_F bzw. die 0,2%-Dehngrenze $\sigma_{0,2}$ bei Raumtemperatur als die auf den Ausgangsquerschnitt A_0 bezogene Belastung, unter der nennenswerte bleibende Verformungen auftreten. Die Fließ- oder Streckgrenze tritt beim Zugversuch im Spannungs-Dehnungs-Schaubild, *Abb. 1.3 a*, bei weichen Stählen als ausgeprägte Unstetigkeit bei einer bestimmten Grenzbeanspruchung in Erscheinung. Bei Werkstoffen, die keine natürliche Fließgrenze aufweisen, verwendet man an ihrer Stelle die 0,2%-Dehngrenze, d. h. die Beanspruchung, bei der die plastische Deh-

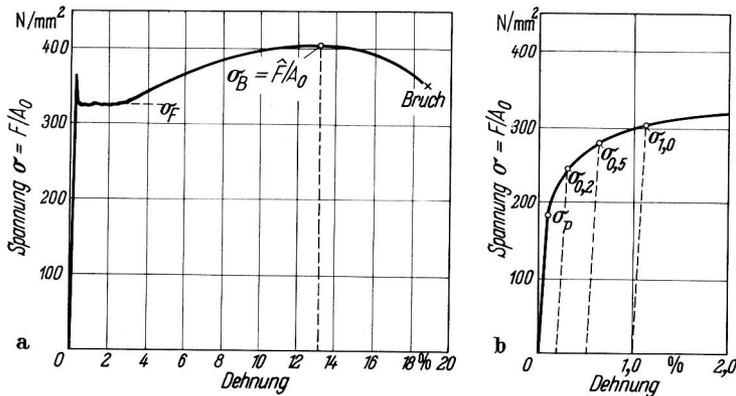


Abb. 1.3 a u. b Spannungs-Dehnungs-Schaubilder mit natürlicher Fließgrenze und mit stetigem Verlauf

nung den Wert von 0,2% erlangt. Die 0,2%-Dehngrenze stellt den Beanspruchungswert dar, unter dem bei Stählen mittlerer Festigkeit die plastische Verformung etwa das Ein- bis Zweifache der elastischen Formänderung erreicht, *Abb. 1.3 b*. Mit der Proportionalitätsgrenze σ_P , d. i. die Spannung, bei der die plastische Verformung beginnt, wird bei der Festigkeitsrechnung kaum gearbeitet.

b) Die Zugfestigkeit σ_B bei Raumtemperatur als die Beanspruchung, die sich als die größte im Zugversuch erreichte Last \hat{F} bezogen auf den Ausgangsquerschnitt A_0 , ergibt.

c) Die Warmstreckgrenze $\sigma_{0,2/\vartheta}$ als die Beanspruchung, unter der bei Betriebstemperatur ϑ nach kurzer Belastungsdauer eine plastische Dehnung von 0,2% auftritt. Die Warmstreckgrenze darf nur bis zu den Temperaturen verwendet werden, unter denen noch kein nennenswertes Kriechen auftritt. Bei Kohlenstoffstählen liegt diese Temperaturgrenze etwa bei 300 bis 350 °C.

Die Grenzdehnung von 0,2% hat sich bei den üblichen Kohlenstoffstählen eingeführt und als brauchbar bewährt. Bei Werkstoffen mit sehr großem Verfestigungsvermögen (z. B. austenitische Stähle), bei denen also die Zugfestigkeit σ_B besonders hoch über der Fließgrenze $\sigma_{0,2}$ liegt, ist die Werkstoffausnutzung bei Verwendung der 0,2%-Dehngrenze schlecht. Es empfiehlt sich deshalb, mit einem auf einer höhe-

⁴ Genaue Definitionen siehe DIN 1602, 50 100, 50 519.