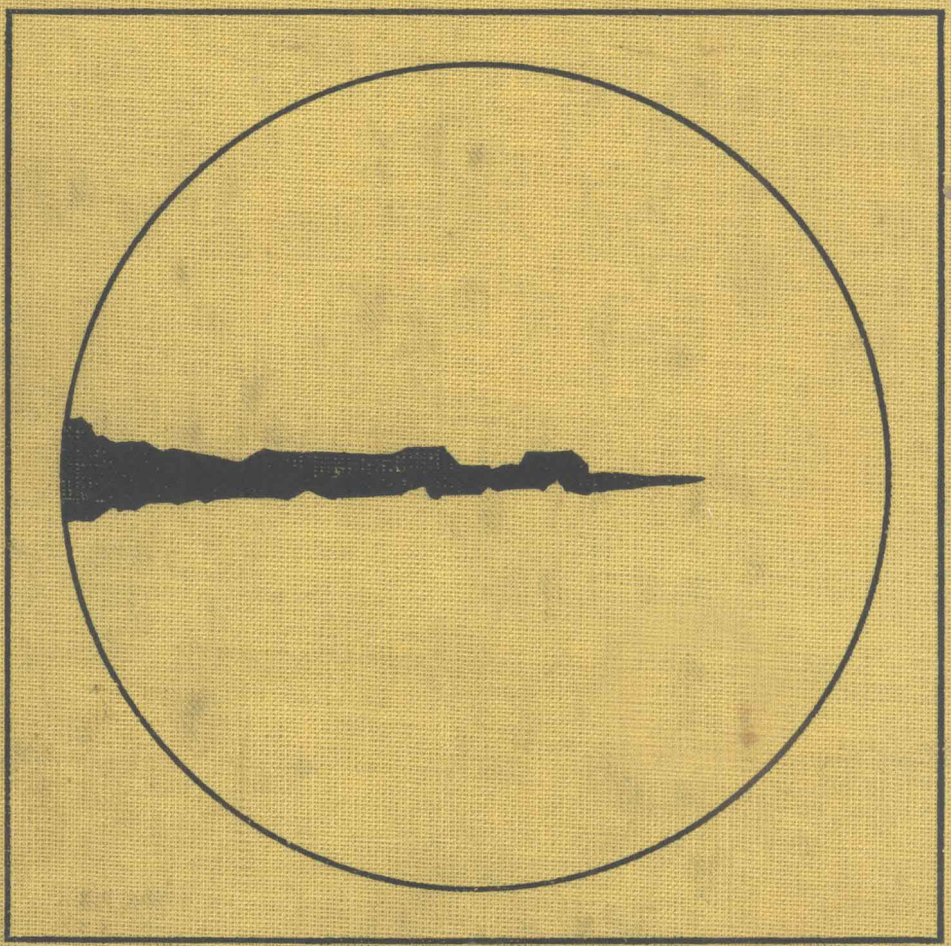
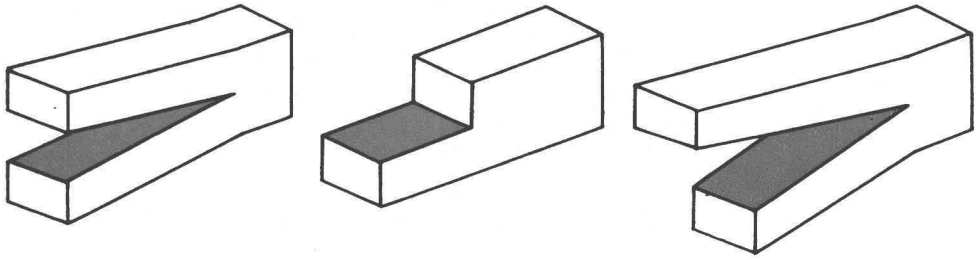


Blumenauer / Pusch
Technische Bruchmechanik



TECHNISCHE BRUCH-MECHANIK

Horst Blumenauer
Gerhard Pusch

Mit 137 Bildern und 38 Tabellen

VEB DEUTSCHER VERLAG
FÜR GRUNDSTOFFINDUSTRIE
LEIPZIG

DISTRIBUTED BY SPRINGER-VERLAG
WIEN - NEW YORK

Autoren

Prof. Dr. sc. techn. *Horst Blumenauer*
Technische Hochschule
Otto von Guericke Magdeburg

Dozent Dr. sc. techn. *Gerhard Pusch*
Bergakademie Freiberg

ISBN 3-211-95805-3 (Springer-Verlag Wien - New York)
1. Auflage
© VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig 1982
Printed in the German Democratic Republic
Satz und Druck: VEB Druckerei „Thomas Müntzer", 5820 Bad Langensalza
Gesamtgestaltung: Gottfried Leonhardt
Redaktionsschluß: 31. 8. 1981

此为试读,需要完整PDF请访问: www.ertongbook.com

Vorwort

Im Jahre 1973 erschien im VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie eine Einführung in die Bruchmechanik. In den seither vergangenen Jahren hat eine außerordentlich intensive Weiterentwicklung dieses im Grenzbereich zwischen Werkstoffwissenschaft und Festkörpermechanik liegenden Wissenschaftsgebiets stattgefunden, und die Bruchmechanik ist zu einem unentbehrlichen Arbeitsmittel bei der Lösung vielfältiger Probleme der technischen Sicherheit und des effektiven Werkstoffeinsatzes geworden.

Es erschien daher notwendig, eine den gegenwärtigen Erkenntnisstand berücksichtigende Einführung in dieses Gebiet zu geben, wobei der Titel »Technische Bruchmechanik« deutlich machen soll, daß der Schwerpunkt auf der Ermittlung bruchmechanischer Werkstoffkennwerte und ihrer Anwendung bei der Dimensionierung, Werkstoffauswahl und Schadensforschung liegt.

Dieses Buch ist vor allem gedacht als Grundlage für die Ausbildung der Studenten sowie die postgraduale Weiterbildung an Hoch- und Ingenieurschulen in den Studienrichtungen des Maschinen-, Bau- und Werkstoffingenieurwesens. Es soll aber auch die ingenieurtechnischen Kader in Berechnungs- und Konstruktionsbüros, Prüflabors, betrieblichen und überbetrieblichen Kontrollorganen zur Anwendung der Bruchmechanik befähigen. Vorausgesetzt werden dabei Kenntnisse in den Grundlagenlehrgebieten Physik, Technische Mechanik, Werkstofftechnik und Konstruktionstechnik.

Der Charakter dieses Buches machte eine Beschränkung in der Stoffauswahl auf die im wesentlichen als gesichert geltenden Erkenntnisse erforderlich; bezüglich vieler Details und noch in der Diskussion befindlicher Fragen muß auf die im Literaturverzeichnis angegebenen Zeitschriften und Tagungsberichte verwiesen werden.

Bei der Erarbeitung des Manuskripts gaben uns viele Fachkollegen Unterstützung; dafür möchten wir herzlich danken. Dem Verlag danken wir für die Bereitschaft zur Herausgabe dieses Buches und das verständnisvolle Eingehen auf unsere Wünsche.

Magdeburg, im Frühjahr 1981

Die Verfasser

Inhaltsverzeichnis

Einführung

1. Bruchverhalten der Werkstoffe

1.1. Ursachen und Kriterien der Entstehung von Brüchen 15

1.1.1. Physikalische Bruchtheorie 15
1.1.2. Rißmodelle 20
1.1.3. Bildung und Ausbreitung von Rissen 23

1.2. Erscheinungsformen des Bruchs 24

1.2.1. Fraktographie und Mikrofraktographie 24
1.2.2. Brucharten 25

1.3. Risse in Halbzeugen und Bauteilen 31

1.3.1. Rißbildung während des Fertigungsprozesses 31
1.3.2. Rißbildung in der Betriebsphase 35
1.3.3. Zerstörungsfreier Nachweis von Rissen 37

2. Konventionelle Bruchsicherheitsnachweise

2.1. Festigkeitsnachweis 40

2.2. Zähigkeitsnachweis 43

2.2.1. Zähigkeitsnachweis mit Hilfe von Übergangstemperaturen . . . 44
2.2.2. Zähigkeitsnachweis mit Hilfe von Grenztemperaturen 46

2.3. Vorschriften für konventionelle Bruchsicherheitsnachweise 51

3. Konzepte der Bruchmechanik

3.1. Linear-elastische Bruchmechanik (LEBM) 54

3.1.1. Spannungsintensitäts-Konzept 54

3.1.2. Energiekonzept 59
3.1.3. Ermittlung der Spannungsintensitätsfaktoren 61
3.1.4. LEBM mit Kleinbereichsfließen 67

3.2. Fließbruchmechanik 68
3.2.1. COD-Konzept 68
3.2.2. *J*-Integral-Konzept 71

3.3. Konzepte für stabiles Rißwachstum 77
3.3.1. Rißwachstum bei schwingender Beanspruchung 77
3.3.2. Rißwachstum bei thermischer Langzeitbeanspruchung 81
3.3.3. Rißwachstum bei Spannungsrißkorrosion 82

3.4. Konzepte für dynamische Rißeinleitung, Rißausbreitung und Rißauffang 82
3.4.1. Dynamische Rißeinleitung 83
3.4.2. Dynamische Rißausbreitung 83

4. Ermittlung bruchmechanischer Werkstoffkennwerte

4.1. Kennwerte für statische Rißeinleitung nach dem LEBM-Konzept . . . 87
4.1.1. Standardmethode zur Bestimmung der Bruchzähigkeit K_{Ic} . . 87
4.1.1.1. Probenherstellung und Probenform 87
4.1.1.2. Versuchsdurchführung 92
4.1.1.3. Versuchsauswertung 95
4.1.2. Spezielle Verfahren und Probenformen zur Bestimmung der Bruchzähigkeit K_{Ic} 99
4.1.2.1. Äquivalentenergie-Methode 99
4.1.2.2. Methode von *Eftis* und *Liebowitz* 102
4.1.2.3. Spezielle Probenformen 103
4.1.2.4. Korrelationen zwischen der Bruchzähigkeit K_{Ic} und konventionellen Werkstoffkennwerten 111

4.2. Kennwerte für statische Rißeinleitung nach dem COD-Konzept 114
4.2.1. Standardmethode zur Bestimmung der kritischen Rißöffnung δ_c 114
4.2.1.1. Probenherstellung und Probenform 114
4.2.1.2. Versuchsdurchführung 114
4.2.1.3. Versuchsauswertung 116
4.2.1.4. Spezielle Verfahren und Probenformen zur Bestimmung von δ_c. . 118

4.3. Kennwerte für statische Rißeinleitung nach dem *J*-Integral-Konzept . . 119

4.4. Kennwerte für stabiles Rißwachstum 127
4.4.1. Bestimmung der R-(Widerstands-)Kurve 127
4.4.2. Bestimmung der Bruchzähigkeit K_{Iscc} unter dem Einfluß korrosiver Medien 128
4.4.3. Bestimmung der Rißwachstumsgeschwindigkeit bei Ermüdungs- und Kriechvorgängen 132
4.4.3.1. Schwingende Beanspruchung 132
4.4.3.2. Thermische Langzeitbeanspruchung 136
4.4.4. Methoden zur Messung der Rißausbreitung 136
4.5. Kennwerte für dynamische Rißeinleitung, Rißausbreitung und Rißauffang 140
4.5.1. Bestimmung dynamischer bruchmechanischer Kennwerte für Rißeinleitung 140
4.5.2. Bestimmung der dynamischen Bruchzähigkeit für Rißauffang K_{Ia} 146
4.5.3. Korrelationen zwischen konventionellen und bruchmechanischen Kennwerten für dynamische Rißeinleitung und Rißauffang . . 147

5. Bruchmechanische Werkstoffkennwerte

5.1. Stähle 149
5.1.1. Maschinenbaustähle 149
5.1.2. Druckbehälterstähle und warmfeste Stähle 154
5.1.3. Höherfeste schweißbare Baustähle 155
5.1.4. Werkzeugstähle 160
5.2. Eisengußwerkstoffe 162
5.3. Leichtmetall-Legierungen 166
5.3.1. Aluminiumlegierungen 166
5.3.2. Titanlegierungen 168
5.4. Polymerwerkstoffe 170
5.5. Keramische Werkstoffe 170
5.6. Verbund- und Sinterwerkstoffe 171
5.7. Sonstige Werkstoffe 173

6. Anwendungsgebiete und Anwendungsbeispiele

6.1. Dimensionierung und Lebensdauerberechnung 174
6.1.1. Bewertung der Bruchsicherheit auf der Basis der LEBM 174
6.1.2. Bewertung der Bruchsicherheit auf der Basis der Fließbruchmechanik 179

6.1.3. Bruchkontrollpläne 181
6.1.4. Anwendungsbeispiele 184
6.1.4.1. Behälter- und Rohrleitungsbau 184
6.1.4.2. Schwere Schmiedestücke für Energieerzeugungsanlagen 188
6.1.4.3. Stahlbau 192
6.1.4.4. Maschinenbau 193

6.2. Schadensfallanalyse 195

6.3. Werkstoffentwicklung und Eigenschaftsoptimierung 196

Literatur- und Quellenverzeichnis 201

Internationale Standards und Prüfempfehlungen zur Bruchmechanik . . . 213

Sachwörterverzeichnis 214

此为试读,需要完整PDF请访问: www.ertongbook.com

Einführung

Eine wichtige Voraussetzung für den ökonomischen Werkstoffeinsatz ist die vollständige Ausnutzung der mechanischen Eigenschaften der Konstruktionswerkstoffe. Dazu ist es jedoch erforderlich, bei der Dimensionierung solche Berechnungs- und Prüfmethoden anzuwenden, die dem Verhalten eines Bauteils unter Betriebsbeanspruchungen weitgehend angepaßt sind und eine ausreichende Sicherheit gegenüber den verschiedenen Möglichkeiten des Versagens gewährleisten.
Der gefährlichste Versagensfall einer mechanisch beanspruchten Konstruktion ist der Bruch, da hierbei neben umfangreichen Sach- und Nachfolgeschäden auch der Verlust von Menschenleben zu befürchten ist. Die steigenden Ansprüche an Sicherheit und Umweltschutz auf der einen und die aus der technischen Entwicklung resultierende Konzentration von potentiell bruchgefährdeten Maschinen und Anlagen auf der anderen Seite haben deshalb zu einer wesentlichen Intensivierung der Forschung über die werkstoffphysikalischen Ursachen von Brüchen und die Möglichkeiten ihrer Verhinderung bzw. technischen Beherrschung geführt.
Ein grundsätzlicher Wandel in den Auffassungen vom Bruch und den Betrachtungen zur Bruchsicherheit ist mit der *Bruchmechanik* eingetreten. Die Bruchmechanik geht davon aus, daß — unabhängig von der äußeren Vielfalt der Bruchercheinungen — die Ausbreitung von Rissen, die entweder während des Fertigungsprozesses oder infolge mechanischer bzw. korrosiver Beanspruchung während der Betriebsphase entstehen können, als einheitliche Bruchursache anzusehen ist. Damit reicht es aber nicht mehr aus, zur Bewertung der Bruchsicherheit die auf völliger »Fehlerfreiheit« beruhenden konventionellen Methoden der Festigkeitsberechnung anzuwenden, sondern die Möglichkeit der Bildung und Ausbreitung von Rissen bzw. rißartigen Werkstoffungänzen muß bei der Werkstoffauswahl und Bauteildimensionierung berücksichtigt werden. Hieraus ergibt sich folgende erweiterte Definition des Festigkeitsbegriffs:
Festigkeit ist der Widerstand eines Werkstoffs bzw. einer Konstruktion gegenüber irreversibler Formänderung und Rißausbreitung.
Bei der Anwendung der Bruchmechanik sind drei Aufgabenkomplexe zu beachten:

1. Ausgehend von kontinuumsmechanischen Rißmodellen ist die Spannungs- und Dehnungsverteilung in Bauteilen mit realen Rißkonfigurationen auf rechnerischem oder experimentellem Wege zu ermitteln und durch geeignete Feldgrößen darzustellen (Charakterisierung der Beanspruchung).

2. Auf der Basis werkstoffphysikalisch begründeter Bruchkriterien sind Kenngrößen zu definieren, mit denen die zum Bruch führenden kritischen Zustände in Abhängigkeit von den Beanspruchungsbedingungen und dem Werkstoffzustand experimentell ermittelt werden können (Charakterisierung der Beanspruchbarkeit).
3. Aus der Gegenüberstellung der Parameter der Beanspruchung und der Beanspruchbarkeit sind für konkrete Belastungs- und Geometriefälle quantitative Aussagen zur Bruchsicherheit sowie zur Grenznutzungsdauer von Bauteilen, Anlagen oder Werkzeugen abzuleiten.

In ihrer historischen Entwicklung beruht die Bruchmechanik auf zwei zunächst unabhängig voneinander entstandenen Bruchkriterien: der *Energie-* und *Spannungshypothese*. Ausgehend von energetischen Betrachtungen (Prinzip der minimalen potentiellen Energie) bei der Ausbreitung von Rissen in Glas hat erstmals 1920 *Griffith* [0.1] eine geschlossene Theorie des Bruchverhaltens rißbehafteter Körper vorgelegt, die allgemein als Ausgangspunkt der Bruchmechanik angesehen wird. Diese allerdings nur für extrem sprödes Werkstoffverhalten geltende Hypothese sagt aus, daß sich ein Riß immer dann ausbreitet, wenn die durch die Rißausbreitung freigesetzte Verzerrungsenergie größer ist als die für die Bildung der Rißflächen benötigte Oberflächenenergie. Die Energiehypothese wurde 1948 durch *Irwin* [0.2] dahingehend verallgemeinert, daß die beim Bruch freiwerdende elastische Verzerrungsenergie als Energiefreisetzungsrate (energy release rate) oder Rißvergrößerungskraft (crack extension force) G bezeichnet und das Erreichen eines werkstoffabhängigen kritischen Wertes G_c als Bruchkriterium angenommen wurde.

Die Anfänge der Spannungshypothese liegen noch weiter zurück; sie gründen sich auf den Versuch einer Berechnung der Spannungsverteilung an Kerben bzw. inneren Hohlstellen [0.3; 0.4; 0.5]. Dabei hat die Problematik der beim Übergang von einem Kerb mit endlichem Radius zur scharfen Rißspitze auftretenden mathematischen Singularität bereits 1907 *Wieghardt* [0.6] veranlaßt vorzuschlagen, als Bruchkriterium nicht die an der Rißspitze auftretenden unendlich hohen »spezifischen Spannungen«, sondern die über eine endliche Strecke »resultierenden Spannungen« zu verwenden. Diese Spannungsmittelwertbildung fand ihre Fortführung in der 1936 von *Neuber* [0.7] eingeführten Hypothese der Mikrostützwirkung, mit der resultierende Spannungen über eine als Werkstoffkonstante angenommene Ersatzstrukturlänge gebildet werden können.

Eine wesentliche Weiterentwicklung der Spannungshypothese wurde 1957 mit der Einführung des Spannungsintensitätsfaktors zur Charakterisierung des Spannungsfeldes in der Umgebung eines Risses durch *Irwin* [0.8] vorgenommen. Damit war erstmals die Möglichkeit zur technischen Bewertung von Rissen, wie sie u. a. an geschweißten Raketengehäusen in Erscheinung traten, gegeben, und es entstand zunächst in den USA das *Konzept der linear-elastischen Bruchmechanik*.

Zu einer beträchtlichen Erweiterung des Anwendungsbereiches der Bruchmechanik führte das 1961 von *Wells* [0.9] vorgeschlagene Konzept der kritischen Rißöffnungsverschiebung (*COD-Konzept*). Durch die Annahme einer den Bruch kontrollierenden kritischen Verformungsgröße wurde es möglich, auch Werkstoffe mit größerer plastischer Verformung vor dem Bruch in bruchmechanische

Betrachtungen einzubeziehen. Heute sind dafür die Begriffe *elastisch-plastische Bruchmechanik* oder *Fließbruchmechanik* üblich. Anfang der 70er Jahre wurde dann mit der zuerst 1968 von *Rice* [0.10] vorgeschlagenen Verwendung des sog. *J-Integrals* als Bruchkriterium für nichtlineares Werkstoffverhalten eine neue Entwicklungsetappe in der Fließbruchmechanik eingeleitet.

Nachdem 1961 durch *Paris* und Mitarbeiter [0.11] das Konzept der linear-elastischen Bruchmechanik erstmals zur quantitativen Beschreibung des allmählichen Wachstums von Ermüdungsrissen angewandt wurde und in der Folgezeit auch für die Spannungsrißkorrosion und das Kriechen modifizierte Bruchkriterien entstanden, ist es möglich, alle in der Praxis auftretenden Brucherscheinungen nach bruchmechanischen Gesichtspunkten zu bewerten.

Die theoretischen Grundlagen dieser Bruchkonzepte, vor allem aber ihre Anwendung in der Technik, wurden wesentlich befruchtet von den durch leistungsfähige EDVA realisierbar gewordenen numerischen Methoden zur Berechnung des Spannungs- und Verformungsfeldes im Rißbereich. Seit den ersten Publikationen [0.12; 0.13] hat vor allem die Methode der finiten Elemente umfassend Eingang in die Bruchmechanik gefunden.

Für die zukünftige Entwicklung der Bruchmechanik zeichnet sich neben der weiteren Vervollkommnung der theoretischen und experimentellen Grundlagen der Fließbruchmechanik und ihrer Anwendung auf komplizierte Bauteil- und Rißgeometrien eine verstärkte Hinwendung zu den dynamischen Vorgängen der Rißausbreitung und der Arretierung schnellaufender Risse ab. Damit werden neue Anwendungsgebiete, z. B. in der Seismik oder Zerkleinerungstechnik, erschlossen.

Eine wichtige Voraussetzung für die breite industrielle Einführung der Bruchmechanik-Konzepte ist eine enge Verbindung zwischen den Prüfmethoden zur Ermittlung bruchmechanischer Kennwerte und der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung. Auf der Grundlage der Bruchmechanik und des quantitativen zerstörungsfreien Nachweises von Rissen bzw. rißartigen Ungänzen wird es möglich, die Abmessungen tolerierbarer Fehler in den Abnahmevorschriften festzulegen und ihre Einhaltung zu überwachen. Eine wichtige noch zu lösende Aufgabe besteht deshalb darin, die bisher im wesentlichen auf Erfahrungswerten beruhenden Kontrollvorschriften mit den Ergebnissen bruchmechanischer Berechnungen in Übereinstimmung zu bringen. Gleichzeitig trägt die Bruchmechanik zur Entwicklung neuartiger Prüfmethoden und -technologien bei, was am Beispiel der Schallemissionsanalyse besonders deutlich wird.

Die Aufforderung zur Nutzung der Ergebnisse der Bruchforschung richtet sich auch an die Werkstoffhersteller. Hierbei geht es um eine verstärkte Anwendung der Bruchmechanik, insbesondere der Fließbruchmechanik, zur Optimierung von Gefüge- und Behandlungszuständen im Hinblick auf die Entwicklung und Herstellung von Werkstoffen mit hoher Bruchresistenz. Da diese Werkstoffe hohen Qualitätsansprüchen genügen müssen und das Auftreten von Werkstoffschädigungen während der Fertigung oder des Betriebs möglichst frühzeitig nachzuweisen ist, erhöhen sich die Anforderungen an die Maßnahmen zur Qualitätssicherung während des technologischen Prozesses sowie zur kontinuierlichen Kontrolle des Betriebszustandes mit Hilfe der technischen Diagnostik.

Aus diesen Darlegungen wird ersichtlich, daß die weitere Entwicklung der Grundlagen und technischen Anwendungen der Bruchmechanik ein abgestimmtes Vorgehen und eine enge Zusammenarbeit auf den Gebieten Festkörperphysik, Festkörpermechanik, Werkstofftechnik und -prüfung, Technologie und Konstruktion zur Voraussetzung hat.

1 Bruchverhalten der Werkstoffe

1.1. Ursachen und Kriterien der Entstehung von Brüchen

1.1.1. Physikalische Bruchtheorie

Als Bruch bezeichnet man die zum Verlust der Tragfähigkeit eines Festkörpers führende Werkstofftrennung in makroskopischen Bereichen. Die physikalische Ursache eines Bruchs besteht darin, daß infolge äußerer und/oder innerer mechanischer Spannungen, z. T. unter Mitwirkung umgebender Medien, die atomaren bzw. molekularen Bindungen zerstört werden und dadurch eine freie Oberfläche entsteht.

Für jeden Werkstoff gibt es eine von den Bindungskräften abhängige *theoretische Bruchspannung* σ_{th}, die unter Annahme der Wirkung einer gleichmäßigen Zugbeanspruchung in einem Kristallgitter wie folgt abschätzbar ist (Bild 1.1):

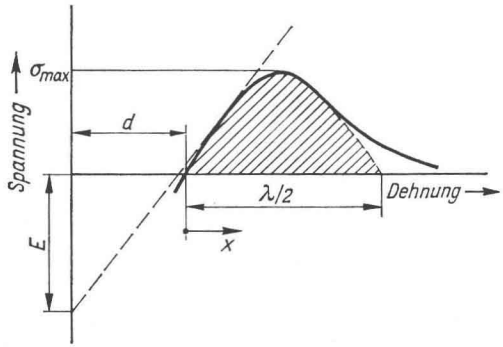


Bild 1.1. Atomare Spannungs-Dehnungs-Kurve

Zur Verschiebung einer atomaren Ebene aus der Gleichgewichtslage um den Betrag x ist eine Spannung

$$\sigma = \sigma_{max} \sin \frac{2\pi x}{\lambda} \approx \sigma_{max} \frac{2\pi x}{\lambda} \tag{1.1}$$

erforderlich, d. h., die atomare Spannungs-Dehnungs-Beziehung kann durch eine sinusförmige Kurve mit der Wellenlänge λ beschrieben werden. Durch Anwendung

des *Hookeschen Gesetzes*

$$\sigma = E\frac{x}{d} \tag{1.2}$$

d Gitterkonstante
E Elastizitätsmodul

erhält man aus (1.1) und (1.2)

$$\sigma_{\max} = \frac{E\lambda}{2\pi d} \tag{1.3}$$

Die beim Zerreißen der Bindungen zwischen den Atomen zu leistende Arbeit (schraffierter Bereich in Bild 1.1) ist

$$\int_{x=0}^{\lambda/2} \sigma_{\max} \sin\frac{2\pi x}{\lambda}\,dx = \frac{\sigma_{\max}\lambda}{\pi} = 2\gamma_0 \tag{1.4}$$

Die Größe γ_0 wird als *spezifische* oder *wahre Oberflächenenergie* bezeichnet.
Aus (1.3) und (1.4) ergibt sich

$$\sigma_{\text{th}} = \sigma_{\max} = \left(\frac{E\gamma_0}{d}\right)^{1/2} \tag{1.5}$$

Die Schwierigkeit einer exakten Berechnung der theoretischen Bruchspannung nach Gl. (1.5) liegt darin, daß die spezifische Oberflächenenergie nicht ohne weiteres zu bestimmen ist. Eine Abschätzung aus den atomaren Bindungskräften ergibt deshalb als Grenzen der theoretischen Bruchspannung

$$\frac{E}{5} > \sigma_{\text{th}} > \frac{E}{15} \tag{1.6}$$

Diese grobe Abschätzung gilt im Prinzip für alle Festkörper. Genauere Berechnungen, die den spezifischen Charakter der Bindungskräfte berücksichtigen, findet man in [1.1].
Die *reale Bruchspannung* liegt jedoch um mehrere Größenordnungen niedriger als diese theoretischen Werte. Ursache dafür ist die Konzentration der Beanspruchung auf wenige atomare Bindungen an der Spitze von Rissen oder rißartigen Werkstoffinhomogenitäten (Bild 1.2). In diesem Fall ergibt sich nach Gl. (1.5) beispielsweise für einen Mikroriß von 3 µm (etwa $10^4\,d$) σ_{th} (mit Riß) $\approx 10^{-2}\,\sigma_{\text{th}}$ (rißfrei).
Weiterhin muß nach der *kinetischen Bruchtheorie* von *Žurkov* [1.2] das Überwinden atomarer bzw. molekularer Bindungen als ein statistisches Ergebnis verschiedener physikalischer Prozesse, bei denen neben der mechanischen Beanspruchung auch die thermischen Fluktuationen der Atome beteiligt sind, betrachtet werden. Dieser Thermofluktuations-Mechanismus ist vor allem bei Polymeren bedeutsam.
Die bisherigen Betrachtungen zur Bruchentstehung stellen noch insofern eine Vereinfachung dar, als beim Vorhandensein ausreichender Gleitmöglichkeiten die an Rissen entstehenden Spannungsspitzen durch die Erzeugung und Bewegung von Versetzungen, d. h. die Bildung einer *plastischen Zone* (s. Abschnitt 3.1.4), wieder

此为试读,需要完整PDF请访问: www.ertongbook.com