

KUNSTSTOFFXTRA

Sonderdruck
aus KunststoffXtra 8 (2018) Nr. 4, S. 14–18



April 2018

4 / 2018

ORGAN VON SWISS PLASTICS + swiss plastics

WIRTSCHAFTSZEITSCHRIFT FÜR WERKSTOFFE – VERARBEITUNG – ANWENDUNG

› **Werkstoffmechanik – Auslegung von Kunststoffkonstruktionen**

Spannungszustand und Werkstoffverhalten

Johannes Kunz



INSTITUT FÜR WERKSTOFFTECHNIK
UND KUNSTSTOFFVERARBEITUNG

Werkstoffmechanik – Auslegung von Kunststoffkonstruktionen

Spannungszustand und Werkstoffverhalten

Der Spannungszustand an einem Bauteil ist auch bei Kunststoffen mitbestimmend für das mechanische Verhalten, insbesondere für die sogenannte Spannungsversprödung bei sonst duktilen Werkstoffen. Die Kenntnis dieser Zusammenhänge ist für eine sachgerechte Bauteilauslegung unverzichtbar. Der Beitrag setzt sich mit dieser Thematik auseinander und stellt eine einfache Methode zur Abgrenzung zwischen duktilem und sprödem Verhalten vor.

Johannes Kunz¹

Bei der Bauteilauslegung spielt die Unterscheidung zwischen duktilem und sprödem Werkstoffverhalten eine wesentliche Rolle. Sie bestimmt zum einen den relevanten Versagensmechanismus und damit den massgebenden Spannungs- oder Dehnungs-Grenzwert. Sie beeinflusst aber auch die Festlegung des Sicherheitsfaktors und die Wahl der geeigneten Festigkeits-hypothese zur Umrechnung des mehrachsigen Spannungszustandes in einen als gleichwertig betrachteten einachsigen Spannungszustand.

Sprödes Verhalten ist gekennzeichnet durch das Fehlen einer plastischen Verformbarkeit und verformungsarmes Bruchversagen. Bekannte Werkstoffe, die sich intrinsisch spröde verhalten, sind z. B. Glas, Keramik, Mineralien und Gusseisen, aber auch Duroplaste mit ihren engmaschig vernetzten Makromolekülen und viele amorphe Thermoplaste wie z. B. Polystyrol.

Es ist bekannt, dass sich aber auch Werkstoffe spröde verhalten können, die unter üblichen Prüf- oder Einsatzbedingungen duktil sind, d. h. plastisch verformbar und von hoher Zähigkeit. Solches tritt vor allem unter schlagartiger Belastung und bei tiefen Temperaturen auf, bei Thermoplasten also unterhalb der Glasübergangstemperatur, wenn die Beweglichkeit der Polymerketten massiv eingeschränkt ist. Ebenso können Alterungserscheinungen Werkstoffe sprödebrüchig werden lassen. Auch ein gleichsinnig mehrachsiger Span-

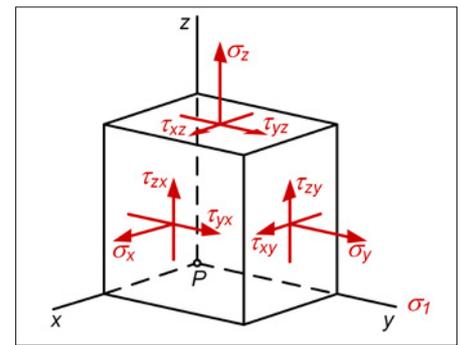


Bild 1: Gleichsinnig räumliche Spannungszustände, insbesondere an Stellen hoher Spannungs-konzentration, können zu Sprödbbruchverhalten führen.

nungszustand kann versprödend wirken. Ansätze zur Erfassung dieser Spannungsversprödung bzw. präziser Spannungszustandsversprödung [1], wie sie vorzugsweise an technischen Kerben oder markanten Querschnittänderungen auftritt (Bild 1), beruhen etwa auf kombiniert theoretisch-empirischen Betrachtungen von Fließkurven und Bruchbedingungen [2, 3] oder auf Überlegungen anhand der Formänderungsenergiedichte [4]. Nachstehend wird eine einfache Möglichkeit zur spröde/duktil-Unterscheidung vorgestellt, basierend auf einer näheren Betrachtung des Spannungszustandes und seines Einflusses auf die Werkstoffmechanik.

Spannungszustand: Charakterisierung und Darstellung

Der Spannungszustand in einem Punkt P eines mechanisch belasteten Körpers hängt bei linear-elastischem Verformungsverhalten, abgesehen von allfälligen Eigen-spannungen, allein von der Geometrie des Körpers und den an ihm wirkenden äusseren Kräften ab. Mit der beliebigen Drehung



Bilder: IWK

Bild 2: Komponenten des dreiachsigen Spannungszustandes im beliebigen kartesischen Koordinatensystem am Punkt P eines mechanisch belasteten Körpers.

des kartesischen Koordinatensystems (x,y,z) um den Punkt P eröffnen sich unendlich viele Möglichkeiten, diesen Spannungszustand durch seine Normal- bzw. Schubspannungskomponenten $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xz}, \tau_{xy}, \tau_{yz}$ darzustellen (Bild 2). In einer solchen Form wird das Charakteristische dieses Spannungszustandes aber nicht wirklich erkennbar.

Kennzeichnend für einen Spannungszustand sind u. a. die Verhältnisse der Schubspannungen zu den Normalspannungen oder die Vorzeichen der Normalspannungen zwecks Differenzierung zwischen Zug und Druck. Wesentlich für das Verständnis eines Spannungszustandes ist vor allem die Anzahl der von Null verschiedenen Hauptspannungen $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$, aufgrund welcher ein-, zwei- und dreiachsige Spannungszustände unterschieden werden. Sollen auch die quantitativen Aspekte in die Beurteilung einbezogen werden, so enthalten die Hauptspannungen zwar alle Informationen. Ihre Darstellung durch die Matrix des Spannungstensors im (1,2,3)-Hauptachsensystem oder durch den Spannungsvektor $\vec{\sigma} = (\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)$ im

¹ Prof. Dipl.-Ing. Johannes Kunz, Institut für Werkstofftechnik und Kunststoffverarbeitung (IWK) an der HSR Hochschule für Technik Rapperswil.

kartesischen Hauptspannungsraum (Bild 3) ist aber wenig anschaulich.

Ein verständlicheres Bild des Spannungszustandes vermittelt der Spannungskreis im σ, τ -Koordinatensystem [5]. In dieser mass- und winkeltreuen Darstellung lässt sich der Spannungszustand in seiner Gesamtheit überblicken (Bild 4). Die drei Kreise umgrenzen das Gebiet aller überhaupt möglichen Kombinationen von Normal- und Schubspannungen.

Die nachfolgenden Betrachtungen verwenden ohne Einschränkung der Allgemeingültigkeit die übliche Nummerierungskonvention $\sigma_1 = \sigma_{max} \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$, aus der auch $\varepsilon_1 = \varepsilon_{max} \geq \varepsilon_2 \geq \varepsilon_3$ hervorgeht.

Mehrachsigkeitsgrad

Verschiedentlich ist versucht worden, Spannungszustände durch eine einzige, z. B. als Mehrachsigeitsgrad bezeichnete Kennzahl zu charakterisieren. Diese wird aus den drei Hauptspannungen gebildet und hängt von deren Verhältnissen zueinander ab, nicht aber von den konkreten Spannungswerten.

Die FKM-Richtlinie «Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile» [6] definiert den Mehrachsigeitsgrad als Verhältnis der hydrostatischen Spannung σ_H zur Vergleichsspannung (9) nach der Gestaltänderungsenergiehypothese (GEH).

$$h = \frac{\sigma_H}{\sigma_{V,GEH}} = \frac{\sqrt{2}}{3} \cdot \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{\sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}} \quad (1)$$

Eine andere Definition nach Schnadt [7] bezieht als Masszahl für den Mehrachsigeitsgrad die GEH-Vergleichsspannung auf die grösste Hauptspannung. Mit $\sigma_1 = \sigma_{max}$ ergibt sich

$$\kappa = \frac{\sigma_{V,GEH}}{\sigma_1} = \frac{1}{\sqrt{2} \cdot \sigma_1} \cdot \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad (2)$$

Kochendörfer und Scholl [8] betrachten den Ausdruck

$$\kappa = 1 - \frac{\sigma_V}{\sigma_1} \quad (3)$$

als Mehrachsigeitszahl, wobei die Vergleichsspannung entweder nach der GEH oder nach der Schubspannungshypothese

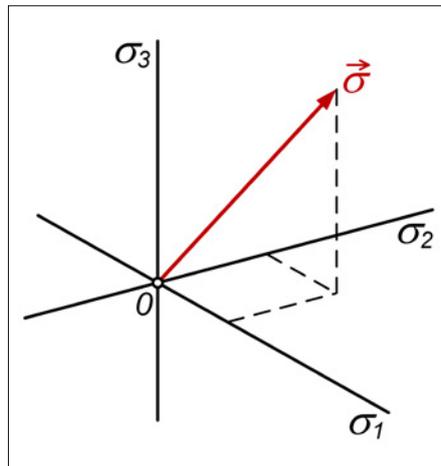


Bild 3: Darstellung des dreiachsigen Spannungszustandes durch den Spannungsvektor im kartesischen Hauptspannungsraum.

(SSH) gemäss (8) einzusetzen ist. Im ersten Fall liefert (3) mit (2) die Beziehung

$$\kappa_{GEH} = 1 - \Pi \quad (4)$$

Der zweite Fall führt mit (8) zu

$$\kappa_{SSH} = 1 - \frac{\sigma_{V,SSH}}{\sigma_1} = 1 - \frac{2 \cdot \tau_{max}}{\sigma_1} = 1 - \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1} = \frac{\sigma_3}{\sigma_1} \quad (5)$$

Eine einfache Auswertung für verschiedene typische Spannungszustände (Tabelle 1) zeigt, dass die hier erwähnten Mehrachsigeitsgrade teils sehr seltsame, kaum aussagekräftige Werte annehmen. Wie soll z. B. die Tatsache interpretiert werden, dass (2) bis (5) für den ein- und den zweiachsigen Spannungszustand gleiche Mehrachsigeitsgrade liefern?

Sachgerecht wäre eine Definition, die für ein-, zwei- und dreiachsige Spannungszustände mit gleich grossen Hauptspannungen die Werte 1, 2 und 3 ergäbe und die Dominanz von Zug bzw. Druck mit den entsprechenden Vorzeichen unterscheidet.

Spannungszustand	Hauptspannungen [N/mm²]			Mehrachsigkeitsgrad				
	σ_1	σ_2	σ_3	FKM	Schnadt	Kochendörfer/Scholl GEH	SSH	„Natürliche“ Definition
Zug einachsige	100	0	0	0,333	1,000	0,000	0,000	1,000
Zug zweiachsige	100	100	0	0,667	1,000	0,000	0,000	2,000
Zug dreiachsige	100	100	100	∞	0,000	1,000	1,000	3,000
Druck einachsige	-100	0	0	-0,333	-1,000	2,000	0,000	-1,000
Druck zweiachsige	-100	-100	0	-0,667	-1,000	2,000	0,000	-2,000
Druck dreiachsige	-100	-100	-100	$-\infty$	0,000	1,000	1,000	-3,000
Reiner Schub	100	0	-100	0,000	1,732	-0,732	-1,000	0,000

Tabelle 1: Mehrachsigeitsgrade unterschiedlicher Definition im Vergleich anhand charakteristischer Spannungszustände.

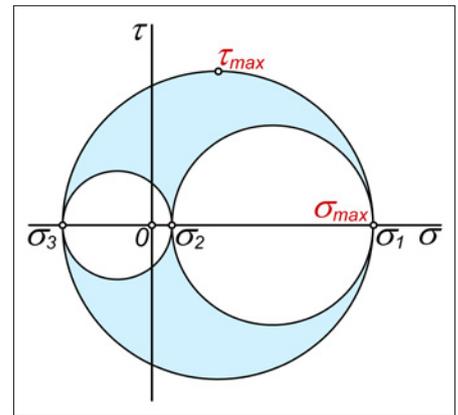


Bild 4: Darstellung des dreiachsigen Spannungszustandes in Form des Spannungskreises [5]. Die drei Kreise umgrenzen das Gebiet aller möglichen Kombinationen von Normal- und Schubspannungen.

den würde. Eine solche «natürliche» Definition des Mehrachsigeitsgrades, wie sie hier vorgestellt wird, besteht aus dem Quotienten der 1. Invarianten («Spur») des Spannungstensors und dem grössten Spannungsbetrag gemäss

$$M = \frac{\sigma_I}{|\sigma|_{max}} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{|\sigma|_{max}} \quad (6)$$

Generell kritisch anzumerken ist, dass alle wie auch immer definierten Mehrachsigeitsgrade in keiner eindeutigen Beziehung zum Spannungszustand stehen. Zwar kann jedem Spannungszustand ein Mehrachsigeitsgrad zugeordnet werden, doch ein bestimmter Mehrachsigeitsgrad kann stets durch beliebig viele, z. T. sehr unterschiedliche Kombinationen der Hauptspannungen $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ erzeugt werden [9]. Dies liegt an der Unmöglichkeit, eine räumliche Gegebenheit mit tensoriellem Charakter durch eine skalare Grösse eindeutig auszudrücken. Es ist daher sehr fraglich, inwieweit sich der Mehrachsigeitsgrad, unabhängig von seiner Definition, als Kriterium

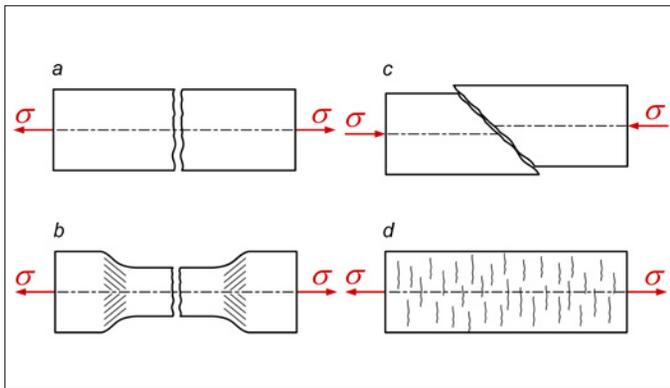


Bild 5: Verschiedene Versagensformen

- a) Verformungsarmer Trennbruch unter zugdominanter Beanspruchung
- b) Trennbruch nach mehr oder weniger grosser Verstreckung unter Zug
- c) Verformungsarmer Gleitbruch unter druckdominanter Beanspruchung
- d) Irreversible Verformung infolge von Mikrorissen und Crazes bei grosser Dehnung.

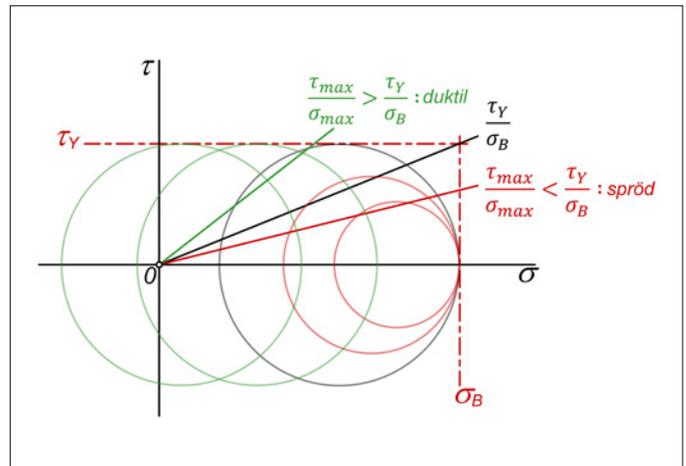


Bild 6: Abgrenzung zwischen duktilem und sprödem Verhalten, dargestellt im Mohrschen σ, τ -Koordinatensystem, in Anlehnung an Gensamer [17] und Issler et al. [1].

zur Unterscheidung zwischen duktilem und sprödem Verhalten eines Werkstoffs und damit zur Wahl der angemessenen Festigkeitshypothese eignet.

Zug- und Druckdominanz

Das Werkstoffverhalten hängt stark davon ab, ob ein Spannungszustand zug- oder druckdominant ist. Unter Druck ist die Belastbarkeit in aller Regel deutlich höher als unter Zug. Ist der Spannungszustand mehrachsiger, so kann z. B. anhand des «natürlichen» Mehrachsigkeitsgrades M gemäss (6) sehr einfach zwischen Zug- und Druckdominanz unterschieden werden. Bei positivem Vorzeichen überwiegt Zug, bei negativem Vorzeichen Druck. Im Zustand reinen Schubes mit $M=0$ liegen diesbezüglich neutrale Verhältnisse vor.

Eine andere Art der Unterscheidung, die auch anhand des Spannungskreises (Bild 4) vorgenommen werden kann, vergleicht die grösste Hauptspannung σ_1 mit dem Betrag $|\sigma_3|$ der kleinsten Hauptspannung, ohne σ_2 in die Beurteilung einzubeziehen. $\sigma_1 > |\sigma_3|$ bedeutet dann Zugdominanz, $\sigma_1 < |\sigma_3|$ Druckdominanz.

Versagensmechanismen und Festigkeitshypothesen

Die bei der Bauteilauslegung als zulässig geltende Beanspruchungsgrösse leitet sich in aller Regel aus einem werkstoffmechanischen Geschehen ab, das die Funktion des Bauteils beeinträchtigt und daher als Kriterium des Versagens betrachtet wird.

Als wichtige Versagensmechanismen gelten Bruch, Verstreckung und irreversible Verformung [10]. Die Art des Versagens hängt aber nicht nur vom Werkstoff ab, sondern auch vom Spannungszustand. Sie bestimmt schliesslich auch die Wahl der geeigneten Festigkeitshypothese zur Umrechnung des mehrachsigen Spannungszustandes in einen als gleichwertig betrachteten einachsigen Spannungszustand.

Bruch als ultimative Versagensart tritt je nach Werkstoffverhalten in Abhängigkeit von Temperatur und Spannungszustand in unterschiedlichen Formen auf [11]. Typische Erscheinungsformen des Bruches sind:

- Verformungsarmer Trennbruch bei sprödem Verhalten unter zugdominanter Beanspruchung (Bild 5a), aber auch nach mehr oder weniger grosser Verstreckung bei duktilem Verhalten (Bild 5b). Diese Bruchform wird am besten mit der Normalspannungshypothese (NSH; nach Galilei, Coulomb, Rankine) erfasst mit der Vergleichsspannung

$$\sigma_{V,NSH} = \sigma_{max} = \sigma_1 \quad (7)$$

- Scher- oder Gleitbruch, entweder verformungslos bei sprödem Verhalten unter druckdominanter Beanspruchung (Bild 5c), und bei duktilem Verhalten nach mehr oder weniger grosser Verstreckung. Dieser Bruchform entspricht die Schubspannungshypothese (SSH; nach Coulomb, Tresca, Mohr). Die Vergleichsspannung ist in diesem Fall

$$\sigma_{V,SSH} = 2 \cdot \tau_{max} = \sigma_1 - \sigma_3 \quad (8)$$

Verstreckung bezeichnet eine Verformung jenseits der Streckgrenze, bei der die Makromoleküle unter ausreichend hohen Schubspannungen in grossem Massstab aneinander abgleiten. Sie ist äusserlich als sog. Weissbruch und Einschnürung, d. h. als starke Querschnittsverjüngung erkennbar [12]. Zur Verstreckung passen vorzugsweise die SSH (8) oder die Gestaltänderungsenergiehypothese (GEH; nach Huber, von Mises, Hencky). Die Vergleichsspannung beträgt

$$\sigma_{V,GEH} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad (9)$$

Irreversible Verformungen am Bauteil stellen sich bei Überschreiten einer bestimmten makroskopischen Dehnung ein, die mit dem Auftreten erster irreversibler Werkstoffveränderungen wie Crazes oder Mikrorissen korreliert (Bild 5d). Kriechversuche zeigen, dass diese makroskopische Dehnung zeitabhängig degressiv abnimmt und für sehr lange Belastungszeiten asymptotisch einem Grenzwert mit werkstofftypischer Grössenordnung zustrebt, und zwar weitgehend unabhängig von Spannungszustand und Temperatur [13, 14]. Dieser Versagensform wird am besten die Grösstdehnungshypothese (GDH; nach Navier) gerecht. Sie führt zur Vergleichsdehnung

$$\epsilon_{V,GDH} = \epsilon_{max} = \epsilon_1 \quad (10)$$

Bei Bedarf können Vergleichsspannungen und -dehnungen mit Hilfe von Span-

nungs-Dehnungs-Diagrammen oder mit dem Hookeschen Gesetz in die jeweils andere Grösse umgewandelt werden.

Spannungsversprödung abschätzen

Ein einfacher Ansatz zur Abschätzung der Spannungsversprödung geht von der Tatsache aus, dass ein Werkstoff unter Zugbeanspruchung durch Trennbruch versagt, d.h. sich spröde verhält, wenn die grösste Normalspannung $\sigma_{max} = \sigma_I$ die Bruchfestigkeit σ_B erreicht, bevor die grösste Schubspannung $\tau_{max} = (\sigma_I - \sigma_3)/2$ an die für Fliesen bzw. Verstreckung erforderliche Grösse τ_Y herankommt (Bild 6). Im umgekehrten Fall verhält sich der Werkstoff duktil. Da τ_Y kaum verfügbar ist, kann mit der SSH oder der GEH ersatzweise die für den Zustand reinen Schubes geltende Beziehung $\tau_Y \approx \sigma_Y/k$ verwendet werden. Bei Anwendung der GEH ist $k=\sqrt{3}$, mit der SSH gilt $k=2$. Mit dem Streckgrenzenverhältnis $s = \sigma_Y/\sigma_B$ lässt sich somit für die Spannungsversprödung unter zugdominanter mehrachsiger Beanspruchung folgende Beziehungskette entwickeln:

$$\tau_{max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \leq \tau_Y \approx \frac{1}{k} \cdot \sigma_Y = \frac{s}{k} \cdot \sigma_B = \frac{s}{k} \cdot \sigma_{max} = \frac{s}{k} \cdot \sigma_1 \quad (11)$$

Bestimmend hierin sind also die grösste und die kleinste Hauptspannung, wobei $\sigma_1 \geq 0$ vorausgesetzt wird; die mittlere Hauptspannung σ_2 ist ohne Einfluss auf die Spannungsversprödung. Bei metallischen Werkstoffen gebräuchlich sind die Bezeichnungen R_m anstelle von σ_B für die Zugfestigkeit und R_e statt σ_Y für die Streckgrenze bzw. bei deren Fehlen die Dehngrenze $R_{p0,2}$ als technische Streckgrenze [6]. Für den praktischen Gebrauch kann durch Umformung aus (11) und Einsetzen obiger Zahlenwerte der Übergang zur Spannungsversprödung abgeschätzt werden mit

$$\frac{\sigma_3}{\sigma_1} \geq 1 - \frac{2}{\sqrt{3} \dots 2} \cdot s \approx 1 - (1 \dots 1,15) \cdot s \quad (12)$$

Die Erfüllung dieser Ungleichungen (11) bzw. (12) bedeutet also, dass mit einem spröden Werkstoffverhalten zu rechnen ist. Das massgebende Hauptspannungsver-

hältnis σ_3/σ_1 entspricht, wie der Vergleich von (12) mit (5) zeigt, der SSH-basierten Mehrachsigeitszahl K_{SSH} . Es lässt sich bei FEM-Analysen durch Einbau einer kleinen Programmergänzung direkt auswerten. Das Streckgrenzenverhältnis liegt im Bereich von $s \approx 0,6$ für duktile metallische Werkstoffe wie z. B. Baustahl. Für Stähle, wie sie für Spritzgiesswerkzeuge eingesetzt werden, gilt $s \approx 0,8$ (Bild 7). Leider ist bei den meisten Kunststoffen aufgrund der verfügbaren Daten ein eigentliches Streckgrenzenverhältnis nicht be-

stimmbare. Behelfsweise kann für ungefüllte teilkristalline Thermoplaste ein Bereich $s \approx 0,6 \dots 1,0$ angenommen werden, mit der Tendenz zu den kleineren Werten bei zunehmender Temperatur. Ein solcher Werkstoff wäre also sprödbrechgefährdet, sobald die kleinste Hauptspannung σ_3 grösser ist als $(-0,15 \dots 0,4) \cdot \sigma_1$. Hochgefüllte teilkristalline Thermoplaste, aber auch amorphe Thermoplaste ohne Weichmacher oder Schlagzähmodifikation, zeigen gewöhnlich ein intrinsisch sprödes Verhalten.



HSR
HOCHSCHULE FÜR TECHNIK
RAPPERSWIL
FHO Fachhochschule Ostschweiz

DAS BINDEGLIED ZWISCHEN WISSENSCHAFT UND INDUSTRIE

Wir bringen unsere Fachkompetenzen als professionelle Partner der Industrie kundenspezifisch und bedürfnisorientiert in Ihre Projekte ein, sei es in Form von Beratungen, Studien, Entwürfen, Konstruktions-, Berechnungs-, Prüfaufträgen oder experimentellen Untersuchungen in unseren Labors.



INSTITUT FÜR WERKSTOFFTECHNIK UND KUNSTSTOFFVERARBEITUNG

IWK Institut für Werkstofftechnik und Kunststoffverarbeitung
Oberseestrasse 10 ■ Postfach 1475 ■ CH-8640 Rapperswil
T +41 (0)55 222 47 70 ■ F +41 (0)55 222 47 69 ■ iw@hsr.ch ■ www.iwk.hsr.ch

Schlussbetrachtung

Die hier vorgestellten Beziehungen (11) und (12) erlauben es dem Ingenieur, bei der festigkeitsmässigen Auslegung der Bauteile den Einfluss des Spannungs-zustandes auf das mechanische Verhalten duktiler Werkstoffe abzuschätzen. Bei ihrer Anwendung muss man sich aber bewusst sein, dass der Übergang zur Spannungsversprödung unscharf ist. Dies liegt nicht nur an der Differenz der Vergleichsspannungsverhältnisse nach der SSH und der GEH, die rund 15% ausmacht, sondern auch an der Tatsache, dass das Werkstoffverhalten auch von weiteren Effekten beeinflusst wird, die hier nicht behandelt

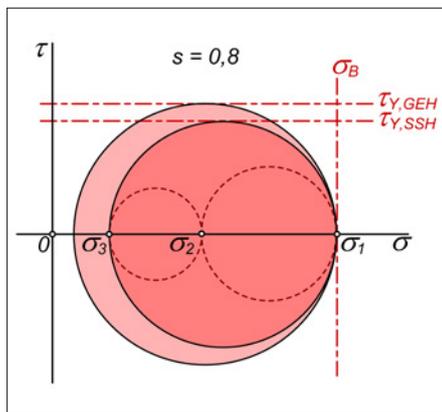


Bild 7: Bereiche sprödbrechgefährlicher Spannungszustände (rot eingefärbt) nach der GEH bzw. SSH in der Mohrschen Kreisdarstellung am Beispiel des Streckgrenzenverhältnisses $s = 0,8$.

wurden und komplexere Theorien erfordern. Dazu gehört insbesondere die Stützwirkung, d.h. die Fähigkeit des Werkstoffs, in Bereichen mit grossem Spannungsgefälle, z.B. bei Kerben, höhere Spannungen zu ertragen als bei gleichmäs-

siger Spannungsverteilung. Ebenso unberücksichtigt sind allfällige Verfestigungseffekte. Die Vernachlässigung solcher Einflüsse bei der Berechnung führt in der Regel zu Resultaten, die auf der sicheren Seite liegen.

Vorstehende Überlegungen sind von Bedeutung, wenn die Bauteile gegen ein Versagen durch Bruch oder durch Verstreckung ausgelegt werden. Sie können entfallen, wenn die Reversibilität der Verformungen als Bemessungskriterium [10, 13, 14] gewählt und die Auslegung dehnungsbezogen durchgeführt wird [15, 16].

Literatur

- [1] Issler, L., Ruoss, H., Häfele, P.: Festigkeitslehre – Grundlagen. Springer Verlag Berlin 1995, S. 315–316
- [2] Rühl, K.: Die Sprödbrechbarkeit von Stahlkonstruktionen. Werner Verlag Düsseldorf 1959
- [3] Valtinat, G.: Kriterium zur Erfassung der Spannungsversprödung von Werkstoffen. Schweißen und Schneiden 23(1971)6, S. 217–219
- [4] Clausmeyer, H.: Kritischer Spannungszustand und Trennbruch unter mehrachsiger Beanspruchung. Konstruktion 21(1969)2, S. 52–59
- [5] Mohr, O.: Über die Darstellung des Spannungszustandes und des Deformationszustandes eines Körperelementes und über die Anwendung derselben in der Festigkeitslehre. Der Civilingenieur 28(1882), S. 113–156
- [6] N. N.: FKM-Richtlinie Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile. 6. August 2012
- [7] Schnadt, H. M.: Neue Prüfmethode von Stählen und Schweisswerkstoffen für grosse Schweisskonstruktionen. Oerlikon Schweissmitt. 15(1957)26, S. 5–87
- [8] Kochendörfer, A., Scholl, H.: Die Sprödbrechneigung von Stählen in Abhängigkeit von Spannungszustand und Temperatur. Stahl und Eisen 77(1957)15, S. 1006–1018

- [9] Dietmann, H.: Spannungszustand und Festigkeitsverhalten. Technisch-wissenschaftliche Berichte der Staatl. Materialprüfungsanstalt an der Universität Stuttgart, Heft 68–04 (1968)
- [10] Kunz, J.: Reversibilität als Auslegungskriterium. Kunststoffe 108(2018)2, S. 67–71
- [11] Michler, G. H.: Kunststoff-Mikromechanik. Morphologie, Deformations- und Bruchmechanismen. Carl Hanser Verlag München 1992
- [12] Ehrenstein, G. W.: Polymer-Werkstoffe. Struktur – Eigenschaften – Anwendung. 3. Aufl. Carl Hanser Verlag München 2011
- [13] Menges, G., Schmidt, H.: Spannungsrissbildung und elastisch-plastisches Verformungsverhalten bei Langzeitbeanspruchung. Plastverarbeiter 19(1968)7, S. 547–551
- [14] Menges, G.: Erleichtertes Verständnis des Werkstoffverhaltens bei verformungsbezogener Betrachtungsweise. Fortschritts-Bericht VDI Reihe 5, Nr. 12 (1971)
- [15] Kunz, J.: Ein Plädoyer für die dehnungsbezogene Auslegung. Kunststoffe 108(2018)4, S. 50–54
- [16] Kunz, J.: Dehnungsbezogene Auslegung bei Schub und Torsion. KunststoffXtra 6(2016)6, S. 14–17
- [17] Gensamer, M.: Strength of Metals under Combined Stresses. ASM American Society for Metals Cleveland 1941

Kontakt

IWK Institut für Werkstofftechnik und Kunststoffverarbeitung an der HSR
 Oberseestrasse 10
 CH-8640 Rapperswil
 +41 55 222 47 70
 jkunz@hsr.ch
 www.iwk.hsr.ch