

Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 103/104 (1934)
Heft: 12

Artikel: Zulässige Beanspruchungen im Maschinenbau
Autor: Sonderberg, C. Richard
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-83288>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 07.05.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

INHALT: Zulässige Beanspruchungen im Maschinenbau. — Das Dolder-Wellenbad in Zürich. — Die Wellenerzeugungsanlage im Dolderbad. — Die Wasserreinigungsanlage des Dolderbades. — Brown Boveri-Elektrokessel zur Heizung des Dolder-Wellenbades. — Mitteilungen: Die Kieserlingbodenbeläge im Wellenbad Dolder. Der Wasserdruck von Sturmwellen auf vertikale Hafenmauern. 100 Jahre eiserne Draht-

seile. Der I. jugoslavische elektrotechnische Kongress. Eidg. Technische Hochschule. Achsbrüche von Eisenbahnfahrzeugen. Neue Holzpflasterbauweisen? Schiffahrtstagungen. Die Vorarbeiten für das neue Grundwasserwerk der Stadt Zürich. Graphische Sammlung der E. T. H. — Wettbewerb: Ausbau des Amtshausplatzes in Solothurn. — Literatur.

Band 104

Der S. I. A. ist für den Inhalt des redaktionellen Teils seiner Verleinsorgane nicht verantwortlich.
Nachdruck von Text oder Abbildungen ist nur mit Zustimmung der Redaktion und nur mit genauer Quellenangabe gestattet.

Nr. 12

Zulässige Beanspruchungen im Maschinenbau.

Von C. RICHARD SODERBERG, Chef der Turbinen-Abteilung der Westinghouse Co., Philadelphia. 1)

Dieser Aufsatz gibt eine kurze Uebersicht über die hauptsächlichsten Seiten der Frage der zulässigen Beanspruchungen im Maschinenbau. Im ersten Teil werden die Hauptfaktoren diskutiert, die den Bruch der Werkstoffe herbeiführen, speziell die Fälle zäher Stoffe unter konstanter und veränderlicher Last. Der zweite Teil gibt eine kurze Uebersicht über die wichtigsten Seiten des Problems bei hohen Temperaturen. Das Hauptresultat dieser Uebersicht ist eine Lösung des Relaxationsproblems, das zur Bestimmung von zulässigen Spannungen in solchen Fällen dienen kann.

I. EINLEITUNG.

Das Problem der mechanischen Festigkeit.

Festigkeitsfragen fallen unter zwei Gesichtspunkte: a) die theoretische oder experimentelle Spannungsanalyse mit Hilfe der Elastizitätstheorie; b) eine Abschätzung der bei dem gegebenen Spannungszustand vorhandenen Bruchgefahr. Die erste Frage wird gewöhnlich genau behandelt, während die zweite nur auf empirischem Wege erledigt werden kann.

Die Aufstellung fester Regeln über zulässige Beanspruchungen setzt eine Genauigkeit in der Formulierung der theoretischen und experimentellen Ergebnisse voraus, die den gegenwärtigen Stand unserer Kunst oft übersteigt. Das ist unvermeidlich und ruft einem Versuch, zwischen unverbindlicher Verschwommenheit und dogmatischem Pochen auf unvollständig sichergestellte Grundsätze zu vermitteln. Manche Ingenieure werden die Hilfe eines kodifizierten Wissens hinsichtlich vieler praktischer Fragen willkommen heissen, die ohne Rücksicht auf den verfügbaren Vorrat an exakten Kenntnissen beantwortet werden müssen.

Das Festigkeitsproblem wird im Folgenden in einem etwas eingeschränkten Sinn betrachtet. Manche wichtige Seiten, wie Instabilität, Kontaktspannungen usw. sind wegen Raumangel ganz weggelassen worden. Die hier vorgeschlagenen Regeln sind teilweise seit mehreren Jahren bei der Firma, mit der der Verfasser assoziiert ist, in Gebrauch. Sie sind eher als mehr oder minder willkürliche Richtlinien denn als selbstverständliche Wahrheiten aufzufassen.

In den letzten Jahren ist über diesen Gegenstand eine beträchtliche Literatur²⁾ erschienen, besonders über veränderliche Beanspruchungen; die Literaturangaben erheben keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

Wesentliche Faktoren der Bruchsicherheit.

Die Zahl der für die Festigkeit erheblichen Variablen ist sehr gross, doch sind die folgenden von fundamentaler Bedeutung: a) Temperatur, b) Zähigkeit, c) Zeitliche Beanspruchungsfolge. Eine kurze Diskussion dieser Faktoren wird im Hinblick auf das Folgende notwendig sein.

Temperatur.

Die Festigkeitseigenschaften unserer Metalle erleiden tiefe Veränderungen, wenn die Temperatur von unternormalen über normale auf erhöhte Werte steigt, bis beim Schmelzpunkt der zähflüssige Zustand erreicht ist. Obgleich

von wohl definierten Grenzen zwischen den verschiedenen Gebieten nicht gesprochen werden kann, ist es für praktische Zwecke erlaubt, zu unterscheiden zwischen a) *normalen Temperaturen*, wo die Festigkeit auf *elastischem Verhalten* — und b) *erhöhten Temperaturen*, wo sie auf *plastischem Verhalten* beruht. Für Stahl und seine Legierungen liegt die Grenze zwischen diesen beiden Gebieten ungefähr bei 250°C.

Zähigkeit.

Eine bestimmte Einteilung der Stoffe nach ihrer Zähigkeit ist gleichfalls schwierig, weil dieser Begriff nur einen Sinn hat, wenn der Spannungszustand angegeben wird. Nichtsdestoweniger weichen die Ergebnisse von Zugversuchen mit weichem Stahl und Gusseisen so grundsätzlich von einander ab, dass wir jenen als zäh und dieses als spröde ansehen können. Auf Grund dieser Verschiedenheit werden die Stoffe eingeteilt in a) zähe Stoffe, bei denen ein Standard-Zugversuch mehr als 5% Dehnung ergibt, und b) spröde Stoffe von weniger als 5% Dehnung.

Zeitgesetz der Beanspruchung.

Als von besonderer Bedeutung hat sich das Zeitelement herausgestellt. Man kann zwischen a) *konstanter* und b) *veränderlicher* Beanspruchung unterscheiden; das Bruchproblem muss in den beiden Fällen verschieden behandelt werden. Die zweite Gruppe umfasst periodische Beanspruchungswechsel und vorübergehende Stösse; diese werden jedoch von der folgenden Diskussion als spezieller Behandlung bedürftig ausgeschlossen.

Die vier folgenden Hauptabschnitte befassen sich mit jenen Kombinationen, bezüglich derer man über ein recht zuverlässiges Wissen verfügt.

II. ZÄHE STOFFE BEI NORMALEN TEMPERATUREN UND KONSTANTER BEANSPRUCHUNG.

Der Zugversuch.

Es gibt viele Prüfverfahren, doch ist zum Zweck der Bruchvoraussage der Zugversuch praktisch die einzige Informationsquelle. Von den durch den Zugversuch gelieferten Grössen hat nur die *Streckgrenze* als ein Mass der Festigkeit allgemeine Sanktion gefunden. Dies beruht auf mehr als einer willkürlichen Auswahl, da die Zuverlässigkeit der meisten Bauteile in Frage gestellt ist, wenn die plastische Deformation einen im Vergleich zur elastischen grossen Wert erreicht. Der Gebrauch von 0,2% dauernder Deformation zur Festlegung der Streckgrenze σ_s von Stoffen, für welche sie sonst nicht scharf bestimmt ist, hat sich bereits eingebürgert.

Beim Zugversuch wird die zulässige Spannung durch die Beziehung

$$u = \frac{\sigma}{\sigma_s} \quad \dots \quad (I)$$

definiert, worin u den *Ausnutzungsfaktor* und σ die wirkliche Spannung bedeuten. $n = \frac{1}{u}$ ist der *Sicherheitsfaktor*, der, obgleich weniger logisch, allgemeiner gebraucht wird.

Die allgemeine Behandlung des Festigkeitsproblems folgt dem Schema dieses Gedankenganges. Sie fusst auf der Annahme, dass es immer möglich ist, eine gewisse Grenzspannung zu finden, die in komplizierteren Fällen die Rolle der Streckgrenze des Zugversuchs spielt. Die Angabe eines bestimmten für u einzusetzenden Wertes fällt ausserhalb dieser Betrachtungen. Sie muss dem verantwortlichen Konstrukteur vorbehalten bleiben, dem diese Regeln Handhaben zur Verwertung seiner Erfahrungen liefern sollen. Es ist hier weniger auf die zahlenmässige

¹⁾ Aus dem Englischen übersetzt von K. H. Grossmann.

²⁾ Von allgemeinen Abhandlungen über zulässige Beanspruchungen seien erwähnt: *Rotscher*: „Sicherheit und Beanspruchung bei der Berechnung von Maschinenteilen“. Maschinenbau 1930, Nr. 7, S. 225. *Fischer*: „Vorschlag zur Feststellung der zulässigen Beanspruchung im Maschinenbau“, V. D. I. 1932, Nr. 19, S. 449. *De Béthune*: „L'avenir de la Résistance des Matériaux“. Revue des Elèves des Ecoles Spéciales de l'Université de Louvain, 1930 à 1931. *Kohn*: „Zusammengesetzte Beanspruchung und Sicherheit bei statischer und wechselnder Belastung“. Schweiz. Bauzeitung 1933, Bd. 102, S. 203. *Soderberg*: (1) „Factor of Safety and Working Stress“. A. S. M. E. 1930, Transactions Nr. 11, p. 13 (APM-52-2). (2) „Working Stresses“. A. S. M. E. 1932, Applied Mechanics, Vol. 1, Nr. 3, p. 131 (APM-55-16).

Festlegung als auf die Definition des Ausnutzungsfaktors abgesehen. Als Höchstwerte, für den günstigsten Fall eines zuverlässigen Baustoffs und genau bekannter Spannungen werden $u = 0,75$ bis $0,80$ benutzt, als Mindestwerte, für Grenzfälle, wo logischere Definitionen dringlich werden, $u = 0,25$ bis $0,30$. Praktisch wird meist $u = 0,3$ bis $0,6$ zu wählen sein.

Festigkeitshypothesen.

Um die Behandlung auf andere Belastungsfälle auszuweiten, ist es nötig, sich auf eine *Theorie der Festigkeit* zu stützen, die auf den Bruchvorgang näher eingeht. Ein beträchtliches experimentelles und theoretisches Material ist jetzt vorhanden³⁾; praktisch stehen nur noch zwei Theorien zur Wahl: a) die *Schubspannungshypothese*, b) die *Mises-Hencky'sche Hypothese der konstanten Gestaltungsenergie*.

Die Schubspannungshypothese.

Gemäss dieser Theorie fusst die Bruchbedingung auf der Annahme, dass der Stoff in den Ebenen grösster Schubspannung zuerst nachgibt, wenn nämlich die dort herrschende Schubspannung einen gewissen Grenzwert erreicht. Wenn die Hauptspannungen, nach absteigender Grösse geordnet, σ_1 , σ_2 und σ_3 sind, tritt die höchste Schubspannung (Abb. 1) in den zu σ_3 parallelen Ebenen auf und hat den Wert $\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$. Die mittlere Hauptspannung σ_2 hätte hiernach keinen Einfluss — ein Umstand, der Zweifel auf die absolute Gültigkeit dieser Theorie geworfen hat. Wenn $\sigma_3 = \sigma_3 = 0$ tritt die maximale Schubspannung $\frac{\sigma_1}{2}$ in gegen σ_1 um 45° geneigten Ebenen auf. Beim Zugversuch versagt demnach der Stoff, wenn die maximale Schubspannung den Wert $0,5 \sigma_s$ erreicht, wo σ_s die Streckgrenze für Zug bedeutet.

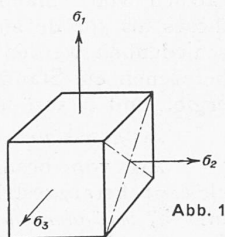


Abb. 1

Die Hypothese von Mises-Hencky.

Das Versagen zäher Stoffe gehorcht, sorgfältigen Versuchen zufolge, dem Gesetz:

$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 = 2 \sigma_s^2$, . . . (2)
wo σ_s wiederum die Streckgrenze bei reinem Zug bedeutet. Die elastische Gestaltungsenergie pro Volumeneinheit ist bei den Hauptspannungen σ_1 , σ_2 , σ_3 :

$$\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{12 G},$$

wo G der Schubmodul ist. Der Bruch beginnt somit, wenn die spezifische Gestaltungsenergie den Wert $\frac{\sigma_s^2}{6 G}$ erreicht, die Wurzel aus der Quadratsumme der Haupt-Schubspannungen also den Wert $\frac{\sigma_s}{\sqrt{2}}$. Soweit der Zugversuch allein in Frage steht, sind die von dieser und der Schubspannungshypothese gelieferten Werte identisch.

Die grösste Diskrepanz tritt bei reiner Schubbeanspruchung auf: Mit $\sigma_1 = -\sigma_3 = \tau$, $\sigma_2 = 0$ wird aus (2):

$$\tau = \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}} = 0,58 \sigma_s, \text{ gegen } 0,5 \sigma_s \text{ nach der Schubspannungshypothese.}$$

Im Fall einer kombinierten Zugspannung σ und Schubspannung τ (Abb. 2) sind die Hauptspannungen, der Grösse nach geordnet: $\sigma_1 = 0,5 (\sigma + \sqrt{\sigma^2 + 4 \tau^2})$, $\sigma_2 = 0$, $\sigma_3 = 0,5 (\sigma - \sqrt{\sigma^2 + 4 \tau^2})$. Die Bruchbedingung wird dann $\sqrt{\sigma^2 + 3 \tau^2} = \sigma_s$, statt $\sqrt{\sigma^2 + 4 \tau^2} = \sigma_s$ bei der Schubspannungshypothese.

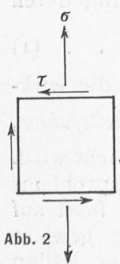


Abb. 2

³⁾ A. Nadai: (1) „Der bildsame Zustand der Werkstoffe“, Julius Springer 1927; (2) „Plasticity“, Engineering Societies Monographs (USA); (3) „Theories of strength“, A. S. M. E. 1932 — Applied Mechanics Vol. I, Nr. 3, S. 111 (APM-55-15). Der letzte Aufsatz enthält Angaben über neuere Versuche. Diese Veröffentlichungen enthalten vollständigere Literaturangaben zu den Festigkeitstheorien.

Die experimentellen Ergebnisse sprechen entschieden für die Hypothese von Mises-Hencky, und wenn es nur auf Genauigkeit ankäme, so würde die Wahl gewiss zugunsten dieser Theorie ausfallen. Die Schubspannungshypothese ist indessen so hervorragend einfach, dass trotz diesem Unterschied zwingende Gründe für ihre Beibehaltung sprechen. Manche Aspekte des Festigkeitsproblems sind so vage, dass der numerische Unterschied zwischen den beiden Theorien (maximal 15 %), ausser bei genau kontrollierten Laboratoriumsversuchen, daneben verschwindet. Darum, und weil die beiden Theorien hinsichtlich des Zugversuches übereinstimmen, ist die Schubspannungshypothese als praktische Richtschnur zur Bestimmung der zulässigen Spannungen beibehalten worden.

Spannungskonzentration.

In vielen Fällen variieren die Spannungen über einen Querschnitt mehr oder weniger schroff. Diese Variation kann eine allmähliche sein, wie im Fall von Biegespannungen (Abb. 3 a), oder eine sehr scharfe, wie im Fall der Spannungskonzentration um ein Loch (Abb. 3 b). Im zweiten Fall kann die Höchstspannung das Dreifache der mittleren betragen; man hat sich für eine geeignete Methode zu entscheiden, um dem Rechnung zu tragen.

Die Erfahrung hat gezeigt, dass bei zähen Stoffen und konstanter Belastung scharfe lokale Spannungskonzentrationen die Bruchgefahr nicht erhöhen, sodass in diesem Fall die Konzentration nicht berücksichtigt zu werden braucht. Im Falle einer allmählichen Spannungsvariation hängt jedoch die Bruchgefahr von dem Höchstwert der Spannung ab. Spannungskonzentrationen sind also nur dann zu vernachlässigen, wenn sie „lokal“ sind, d. h. wenn die Zähigkeit des Stoffes ein Nachgeben bis zum Spannungsausgleich gestattet.

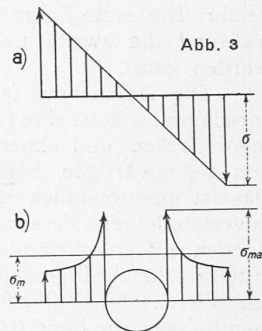


Abb. 3

Zulässige Spannungen.

Nach dem Gesagten sind die Regeln über die zulässigen Beanspruchungen nun leicht zu formulieren. Sie sind im Folgenden durch die Definition des Ausnutzungsfaktors bestimmt:

$$a) \text{ Zug, Druck, Biegung: } u = \frac{\sigma}{\sigma_s}, \quad \dots \quad (3)$$

$$b) \text{ Reiner Schub: } u = 2 \frac{\tau}{\sigma_s}, \quad \dots \quad (4)$$

$$c) \text{ Zusammengesetzte Beanspruchung, allgemeiner Fall: } u = 2 \frac{\tau_{\max}}{\sigma_s}, \quad \dots \quad (5)$$

$$d) \text{ Zug und Schub: } u = \frac{\sqrt{\sigma^2 + 4 \tau^2}}{\sigma_s}, \quad \dots \quad (6)$$

Die Spannungen werden in jedem Fall ohne Rücksicht auf lokale Konzentrationen geschätzt.

III. ZÄHE STOFFE BEI NORMALEN TEMPERATUREN UND VERÄNDERLICHER BEANSPRUCHUNG.

Die einfache Ermüdungsprobe.

Die Ergebnisse des vorangehenden Abschnitts erleiden tiefe Veränderungen, wenn die Belastung zeitlich variiert. Im allgemeinen Fall veränderlicher Beanspruchung tritt eine Dauerspannung σ_0 und eine variable Spannung von der Amplitude σ_v auf (Abb. 4). Die experimentellen Daten werden gewöhnlich durch Biege-, nur selten durch Zugversuche geliefert, doch sei der Einfachheit halber das letzte angenommen. Die Festigkeitseigenschaften unter dem Einfluss der Dauerkomponente sind im II. Abschnitt erörtert worden. Für praktische Zwecke ist die Festigkeit in der Streckgrenze σ_s verkörpert.

Wenn die Spannung mit der Amplitude σ_v wechselt, kann der Bruch auf Grund ausgedehnter Experimente

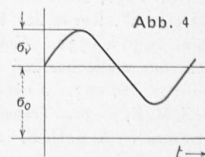


Abb. 4

vorausgesagt werden. Der Bruch in Form von spröden Rissen wird beschleunigt, wenn die Spannungsamplitude einen gewöhnlich als *Dauerfestigkeit* bezeichneten Wert σ_D erreicht. Sie wird experimentell mit 10^7 bis 10^8 Wechsels festgestellt; praktisch hält das Material unendlich viele Wechsel aus, solange deren Amplitude kleiner als σ_D ist. Die Frequenz und die Form der Spannungskurve haben innert weiten Grenzen keinen merklichen Einfluss; es kommt nur auf den zeitlichen Höchstwert der Spannung an.

Ein wichtiger Unterschied gegenüber der konstanten Belastung betrifft den Einfluss der Spannungskonzentration. Bei veränderlicher Beanspruchung beeinflussen sowohl die mittlere, als auch die lokale Höchstspannung den Bruch. Er hängt von der Schroffheit der Spannungskonzentration, dem Material und andern Umständen ab, die eine genaue Bestimmung des Konzentrationsfaktors schwierig machen.⁴⁾

Gleich wichtig ist die Abhängigkeit der Ermüdungsgrenze von andern Faktoren wie Korrosion, atmosphärischer Temperatur, Bearbeitung der Oberfläche usw.⁵⁾ Das veröffentlichte Material über Korrosions-Ermüdung lässt vermuten, dass es sich um mehr als eine blosse Verschiebung der Dauerfestigkeit handelt; ja es stellt die Existenz dieser Grenze in Frage. Vorläufig muss jeder Fall gesondert betrachtet werden. Im Folgenden wird angenommen, dass der wahre Wert der Dauerfestigkeit σ_D und der passende Konzentrationsfaktor k für die Verhältnisse des jeweiligen Problems festgestellt worden seien.

Superposition von dauernder und wechselnder Beanspruchung.

Die Wirkungen einzeln wirkender Spannungen σ_0 und $+k\sigma_v$ als völlig bestimmt vorausgesetzt, wirft die gleichzeitige Beanspruchung durch diese Spannungen immer noch ein wichtiges Problem auf. Die Versuchsergebnisse sind recht ausgedehnt und gestatten gewisse Folgerungen.⁶⁾ In der Weise von Abb. 5 dargestellt, ist die Bruchbedingung zwischen σ_0 und $k\sigma_v$ gewöhnlich eine durch $(0, \sigma_D)$ gehende Kurve, die fast immer ausserhalb der durch $(0, \sigma_D)$ und $(\sigma_s, 0)$ bestimmten Geraden verläuft. Angesichts der Unbestimmtheit des vorhandenen Materials scheint es geboten, das Problem so zu behandeln, als ob diese Gerade die wirkliche Bruchbedingung darstelle, zumal man so fast immer auf der sicheren Seite ist. Die Gleichung dieser Geraden,

$\frac{\sigma_0}{\sigma_s} + \frac{k\sigma_v}{\sigma_D} = 1$, bestimmt dann die den Bruch herbeiführenden Kombinationen von σ_0 und σ_v . Um einen Aus-

nutzungsfaktor u (Sicherheitsfaktor $\frac{1}{u}$) zu erhalten, müssen die Spannungen der Beziehung

$$\frac{\sigma_0}{\sigma_s} + \frac{k\sigma_v}{\sigma_D} = u \quad (7)$$

genügen, also der Gleichung der die Punkte $(0, u\sigma_D)$

⁴⁾ Peterson: „Stress Concentration Phenomena in Fatigue of Metals“, ASME 1932, Applied Mechanics, Vol. 1, Nr. 4, S. 157 (APM-55-19). Dieser Aufsatz enthält ein ziemlich vollständiges Literaturverzeichnis über diesen Gegenstand.

⁵⁾ Lea: „The Strength of Metals as Affected by Discontinuities and Surface Conditions“, Engineering, 26. Aug. und 2. Sept. 1926.

Hankins und Becker: „The Fatigue Resistance of Unmachined Forged Steel“, Engineering, 30. Sept. 1932.

Gough: „Corrosion Fatigue of Metals“, The Institute of Metals, London, 12. Sept. 1932.

Gould: „The Influence of Solution Concentration on the Severity of Corrosion Fatigue“, Engineering, 27. Okt. 1933, S. 453.

F. G. Straub: „Caustic Embrittlement in Boilers“, University of Illinois Bulletin, Nr. 216.

⁶⁾ Haigh: „Alternating Stress Tests of a Sample of Mild Steel“, Report British Association 1915, S. 163.

Moore: „An Investigation of the Fatigue of Metals“, University of Illinois Eng. station Bulletin Nr. 136.

Fischer: Siehe Anmerkung 2.

Moderohn: „Grenzspannungskurven“, Maschinenbau 1931, Nr. 3, S. 78.

und $(u\sigma_s, 0)$ verbindenden Geraden. Offenbar stellen $u_0 = \frac{\sigma_0}{\sigma_s}$ und $u_v = \frac{k\sigma_v}{\sigma_D}$ die Ausnutzungsfaktoren für den Fall dar, dass die bezüglichen Spannungen allein wirken würden, sodass die obige Gleichung geschrieben werden kann:

$$u_0 + u_v = u. \quad (8)$$

Mit anderen Worten postuliert diese Ueberlegung ein einfaches „Superpositions“gesetz für dauernde und wechselnde Spannung. Gleichung (8) kann auch geschrieben werden:

$$u = \frac{\sigma_0 + k \frac{\sigma_s}{\sigma_D} \sigma_v}{\sigma_s}, \quad (9)$$

in welcher Form sie die Tatsache ausspricht, dass zu der dauernden Spannung die Amplitude der wechselnden, mit dem „Gewicht“ $k \frac{\sigma_s}{\sigma_D}$ versehen, zu addieren ist.

Zusammengesetzte Beanspruchung.

Die Schwierigkeiten werden weit grösser, wenn Fälle kombinierter Beanspruchung betrachtet werden, weil hierüber sehr wenig experimentelles Material vorliegt. Für den Fall veränderlicher zusammengesetzter Beanspruchung ist noch keine befriedigende Festigkeitstheorie formuliert worden, und es mag richtiger sein, diesen Versagensfall zu den spröden Brüchen zu rechnen. Die Gestalt der Ermüdungsbrüche von zähen Stoffen deutet oft darauf hin, dass die Theorie der grössten Hauptspannung die passende ist. Torsions-Ermüdungsversuche haben indessen Resultate ergeben, die mit der Schubspannungshypothese nicht unvereinbar scheinen.⁷⁾ So ist die Dauerfestigkeit für Schub als annähernd halb so gross wie die für Zug ermittelt worden. Angesichts dieser Ergebnisse sei vorgeschlagen, die (in einem gleich zu präzisierenden Sinn erweiterte) Schubspannungshypothese auch für veränderliche Belastung wegen ihrer Einfachheit vorderhand beizubehalten.

Unter der Annahme, dass Streckgrenze und Dauerfestigkeit für Schub halb so gross sind wie für Zug, nimmt hier die Grenzbedingung (7) zwischen der konstanten Komponente τ_0 und der Amplitude der variablen Komponente $k_t \tau_v$ der Schubspannung in einer gegebenen Ebene folgende Form an:

$$\frac{2\tau_0}{\sigma_s} + \frac{2k_t \tau_v}{\sigma_D} = 1$$

Der Bruch wird in jenen Ebenen zuerst eintreten, für die der Ausnutzungsfaktor

$$u = \frac{2\tau_0}{\sigma_s} + \frac{2k_t \tau_v}{\sigma_D} \quad (10)$$

den grössten Wert erreicht.

Diese Annahme ersetzt eigentlich die gewöhnliche maximale Schubspannungshypothese durch eine Theorie der maximalen Ausnutzung, wobei der Begriff der Ausnutzung den durch (10) definierten Sinn hat. Es darf nicht übersehen werden, dass diese Hypothese etwas willkürlich ist und dass sie nicht auf festem experimentellem Grunde ruht. Die Fehler liegen jedoch immer auf der sicheren Seite.

Die Bruchebene wird erhalten, indem man u als eine Funktion der Stellung der Ebene ausdrückt und jene Stellung bestimmt, die u zu einem Maximum macht. Dies wird am besten durch den häufigen Fall kombinierten Zuges

$\sigma_0 \pm k_\sigma \sigma_v$ und Schubs $\tau_0 \pm k_t \tau_v$ (Abb. 6)

illustriert. Die Schubspannung in der Ebene PP besteht aus dem konstanten

Anteil $\frac{\sigma_0}{2} \sin 2\alpha + \tau_0 \cos 2\alpha$ und einem

veränderlichen Anteil vom Höchstwert

$\frac{k_\sigma \sigma_v}{2} \sin 2\alpha + k_t \tau_v \cos 2\alpha$. Der Aus-

nutzungsfaktor ergibt sich also für diese

Ebene aus Gl. (10) zu

$$u_\alpha = \frac{\sigma_0 \sin 2\alpha + 2\tau_0 \cos 2\alpha + \frac{k_\sigma \sigma_v \sin 2\alpha + 2k_t \tau_v \cos 2\alpha}{\sigma_D}}{\sigma_D} \quad (11)$$

⁷⁾ Lea: „Combined Torsional and Repeated Bending Stresses“, Engineering, August 1926.

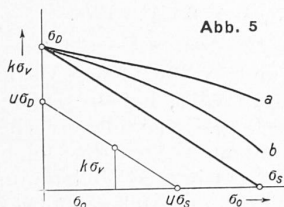


Abb. 5

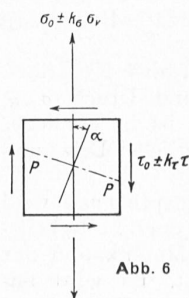


Abb. 6

u wird für

$$\tan 2\alpha = \frac{\sigma_0 + k_\sigma \sigma_v \frac{\sigma_s}{\sigma_D}}{2 \left(\tau_0 + k_\tau \tau_v \frac{\sigma_s}{\sigma_D} \right)} \quad (12)$$

maximal. Für $\sigma_D = \sigma_s$ ist dies die Fläche grösster Schubspannung. Der Ausnützungsfaktor in der durch (12) bestimmten Ebene ist

$$u = \frac{\sqrt{\left(\sigma_0 + k_\sigma \sigma_v \frac{\sigma_s}{\sigma_D} \right)^2 + 4 \left(\tau_0 + k_\tau \tau_v \frac{\sigma_s}{\sigma_D} \right)^2}}{\sigma_s} \quad (13)$$

Die Bedingung, dass dieser Ausdruck einen gewissen Betrag nicht überschreiten darf, bestimmt die zulässigen Spannungen für diesen Fall.

Wenn die veränderlichen Spannungsanteile als kleine Zusätze zu den konstanten Spannungen treten, ist es manchmal bequem, die „Gewichte“

$$K_\sigma = 1 + k_\sigma \frac{\sigma_v}{\sigma_0} \frac{\sigma_s}{\sigma_D}$$

$$\text{und } K_\tau = 1 + k_\tau \frac{\tau_v}{\tau_0} \frac{\sigma_s}{\sigma_D} \quad (14)$$

einzuführen. Der Ausdruck für den grössten Ausnützungsfaktor vereinfacht sich dann zu

$$u = \frac{\sqrt{(K_\sigma \sigma_0)^2 + 4 (K_\tau \tau_0)^2}}{\sigma_s} \quad (15)$$

Die Mitteilung mag interessieren, dass diese Methode in Gebrauch gewesen ist, ehe ihre obige Begründung bekannt war.⁸⁾

Regeln für zulässige Spannungen.

Zusammenfassend können nun die folgenden Regeln aufgestellt werden:

a) Wechselnde Beanspruchung auf Zug, Druck und Biegung: $u = \frac{k \sigma_v}{\sigma_D} \quad (16)$

b) Wechselnde Schubbeanspruchung:

$$u = 2 \frac{k \tau_v}{\sigma_D} \quad (17)$$

c) Kombiniert veränderliche Zugbeanspruchung:

$$u = \frac{\sigma_0}{\sigma_s} + \frac{k \sigma_v}{\sigma_D} = \frac{\sigma_0 + k \frac{\sigma_s}{\sigma_D} \sigma_v}{\sigma_s} \quad (18)$$

d) Allgemeiner Fall kombiniert veränderlicher Beanspruchung: $u = 2 \left(\frac{\tau_0}{\sigma_s} + \frac{k \tau_v}{\sigma_D} \right) \quad (19)$

worin τ_0 die konstante Komponente und $k \tau_v$ die Amplitude der variablen Komponente der Schubspannung in der Ebene der grössten Ausnützung bedeuten, d. h. der Ebene, für die der Ausdruck rechts vom Gleichheitszeichen maximal wird.

e) Spezialfall der kombiniert veränderlichen Zug- und Schubbeanspruchung ($\sigma_0 \pm k_v \sigma_v$, $\tau_0 \pm k_\tau \tau_v$):

$$u = \frac{\sqrt{\left(\sigma_0 + k_\sigma \sigma_v \frac{\sigma_s}{\sigma_D} \right)^2 + 4 \left(\tau_0 + k_\tau \tau_v \frac{\sigma_s}{\sigma_D} \right)^2}}{\sigma_s} \quad (20)$$

IV. SPRÖDE STOFFE.

Unsere Kenntnis der spröden Stoffe ist, verglichen mit jener der zähen Stoffe, sehr mager. Das Verhalten der spröden Stoffe unter gewissen Beanspruchungen ist sehr unberechenbar. Sie werden in Festigkeitsproblemen gewöhnlich als unzuverlässige Materialien von sekundärer Bedeutung klassifiziert.

Die Bruchfestigkeit σ_B bzw. σ_{-B} ist das Kriterium. Ihr Wert ist gewöhnlich für Zug (σ_B) und Druck (σ_{-B}) verschieden. Die Spannungskonzentration ist in ähnlicher Weise wie bei zähen Stoffen unter veränderlicher Belastung zu berücksichtigen.

Der Fall der zusammengesetzten Beanspruchung wird durch keine der für zähe Stoffe vorgeschlagenen Festigkeits-hypothesen voll gedeckt; doch wird eine Modifikation der Mohr'schen Theorie allgemein angewandt. Es wird an-

⁸⁾ „Code for Design of Transmission Shafting“, American Standards Association, 1927. — Siehe auch die in Anmerkung 1 zitierte Abhandlung des Verfassers „Factor of Safety and Working stress“.

DAS WELLEN- UND SONNENBAD IM DOLDER, ZÜRICH

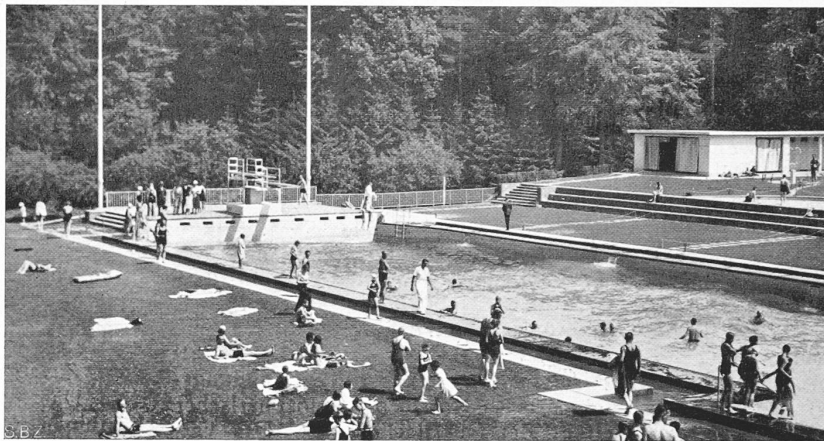


Abb. 2. Blick aus Süden über das Schwimmbassin, rechts hinten das Kinder-Planschbecken.

genommen, dass der Bruch nur von der grössten, σ_1 , und der kleinsten, σ_3 , der Hauptspannungen abhängt. In dem Mohr'schen Diagramm (Abb. 7) wird der Bruch durch Spannungszustände herbeigeführt, deren zugehörige Spannungskreise die Tangenten zu den Kreisen A und B überschneiden.

Unter veränderlicher Belastung haben sich die spröden Stoffe als äusserst unberechenbar erwiesen, und es ist besser, ihre Verwendung in solchen Fällen zu vermeiden. Ueber spröde Stoffe bei hohen Temperaturen bestehen praktisch keine zuverlässigen Angaben, sodass dieses Thema gegenwärtig am besten ausgelassen wird. (Schluss folgt).

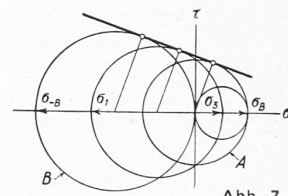


Abb. 7

Das Dolder-Wellenbad in Zürich.

Entwurf und Ausführung von EMIL REIN, Arch. S.I.A., Zürich.

In der Erkenntnis, dass das Baden in kristallklarem, stets temperiertem Bassinwasser und in künstlichen Wellen von Vielen dem Seebad vorgezogen wird, hat die Dolderbahn A.-G. auf ihrem rd. 40 000 m² grossen, von herrlichen Buchen- und Tannenwäldern umrahmten Areal im Dolderpark ein grosszügig angelegtes Schwimm-, Wellen- und Sonnen-Bad erstellen lassen. Es liegt unmittelbar südwestlich neben der Kunsteisbahn, die bereits am 9. Januar 1932 (Bd. 99, S. 13*) in der „SBZ“ beschrieben worden ist. Bei der Disposition der neuen Anlage und ihrer einzelnen Bestandteile wurde der Zweckbestimmung des Familienbades besonders Rechnung getragen und versucht, nicht nur die modernsten technischen Einrichtungen zu schaffen, sondern auch den Gesamtbau, seiner idyllischen Lage entsprechend, in künstlerischer Hinsicht gut zu gestalten.

Aus Abb. 1 liest man folgende Gliederung der an das bestehende Restaurant-Gebäude der Kunsteisbahn anschliessenden Anlage: Eingangs- und Badehaus; Schwimmbassin und Planschbecken und schliesslich Filter- und Sterilisationsgebäude mit Wellenmaschine.

Eingangs- und Badehaus. Die Badegäste gelangen durch den geräumigen Eingangsraum, an dem Kassen, Kontrolle und Wäscheausgabe liegen, in den erhöht gelegenen Wirtschaftsgarten und geniessen sofort einen Ueberblick über die gesamte Badeanlage. Einige Stufen führen in den Schmuckhof vor dem Zellengebäude, das ihn in Hufeisenform mit einem grossen Säulengang umschliesst. Der klare Grundriss des Zellengebäudes erleichtert den Badebetrieb und verunmöglicht eine Stauung der Badegäste. Zur Erleichterung der Badebetriebsabwicklung enthält das Zellengebäude im Halbkreis um die zentral im Rundbau gelegene Garderobe 25 Wechselkabinen, in denen der Badegast sich