Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung

Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine

Band: 105/106 (1935)

Heft: 3

Artikel: Die "Gestaltfestigkeit": der Einfluss der Form auf die Festigkeitseigenschaften

Autor: Thum, A.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-47464

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. 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. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

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. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

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. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 22.07.2025

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

INHALT: Die „Gestaltfestigkeit": der Einfluss der Form auf die Festigkeitseigenschaften. — Hotel und Kino „Urban" in Zürich. — Die Anwendung von Nitropentaerythrit in der zivilen Sprengtechnik. — Architektenkongress in Rom, 22. bis 28. September. — Mitteilungen: Deutsche Rohstoffwirtschaft und Reichsbahn. Vom Bau der transiranischen Eisenbahn. Der Ausbau des Hafens von Le Havre. Eine Schleppseilanlage für Skifahrer in Mégève, Savoyen. Eidg. Technische Hochschule. Technikum Winterthur. Reibungscharakteristik, Leistungscharakteristik und Betriebsleistung neuzeitlicher Dampf- und Wechselstrom-Lokomotiven. Die Neckarkanalisierung. Schweisskurs. — Literatur: Die Berechnung verankerter Hängebrücken. Aufgaben aus der Flugzeugstatik. Eingegangene Werke. — Mitteilungen der Vereine.

Band 106 Der S. I. A. ist für den Inhalt des redaktionellen Teils seiner Vereinsorgane nicht verantwortlich. Nachdruck von Text oder Abbildungen ist nur mit Zustimmung der Redaktion und nur mit genauer Quellenangabe gestattet. Nr. 3

Die „Gestaltfestigkeit": der Einfluss der Form auf die Festigkeitseigenschaften.

Von Prof. Dr. A. THUM VDI, T. H. Darmstadt, und Dipl.-Ing. W. BAUTZ VDI, Darmstadt.

Allgemeines: Die elementare Festigkeitslehre legte die Annahme gleichmässig verteilter oder linear ansteigender Spannungen, der sog. Nennspannungen, zugrunde, die aus den bekannten Beziehungen $\sigma_n = \frac{P}{f}$ bzw. $\frac{M}{W}$ erhalten werden. Diese Annahme ist berechtigt bei glatten Zylindern, Ringen, Platten usw., nicht aber z. B. an den Uebergängen von einem Querschnitt in den anderen. Gerade solche Uebergänge usw., solche Kerben sind aber massgebend für die Bruchgefahr, weil an ihnen starke Spannungsanhäufungen stattfinden (Abb. 1). Die durch die äussere Belastung in einem Werkstoff erzeugten Spannungen sind also von der Form des betreffenden Probestabes oder Konstruktionsteiles abhängig. Die festgestellten Festigkeitswerte sind deshalb auch durch die Gestalt des Probekörpers beeinflusst, und es ist wesentlich, zu erkennen, dass die Formfestigkeit namentlich bei wechselnder Beanspruchung grundverschieden von der am glatten Stabe ermittelten sein kann. Der Einfluss der Form ist bei den einzelnen Beanspruchungsarten verschieden. Bei Abweichungen des Werkstoffverhaltens vom Hooke'schen Gesetz ist ferner zwischen der mit seiner Hilfe ermittelten theoretischen (reiner Formeinfluss) und der wirklichen Kerbwirkung (Einfluss von Form und Werkstoff) zu unterscheiden.

Die Kerbe im Bereich statischer Verformung. Die Verteilung der Spannungen müsste grundsätzlich in allen Fällen mit Hilfe der elastischen Grundgleichungen bestimmt werden können. Die Form der für die Technik wichtigen Berandungen gestattet jedoch meist keine Lösung der Differentialgleichung, sodass an ihre Stelle Annäherungsverfahren, numerische oder graphische, zu treten haben [vrgl. Literatur 1, 2, 3, 4, 5, am Schluss, S. 30]. Weniger zeitraubend und unter Umständen noch genauer können Modellversuche zu genauen oder angenähert richtigen Lösungen führen. Hierbei verwendet man die Uebereinstimmung der Differentialgleichung des betreffenden Beanspruchungsfalles mit der irgend eines bei gegebenen Randbedingungen leichter darstellbaren und messbaren Vorganges aus anderen Teilen der Physik. Man erhält so sowohl die Grösse der Spannungsspitze als auch die Verteilung der Spannungen über den Querschnitt. Für die Bemessung ist die Grösse der Spannungsspitze bezw. ihr Verhältnis zur Grösse der nach den Regeln der elementaren Festigkeitslehre erhaltenen, die sogenannte Formziffer α_k wichtiger als die mehr theoretisch interessante Verteilung (Abb. 2).

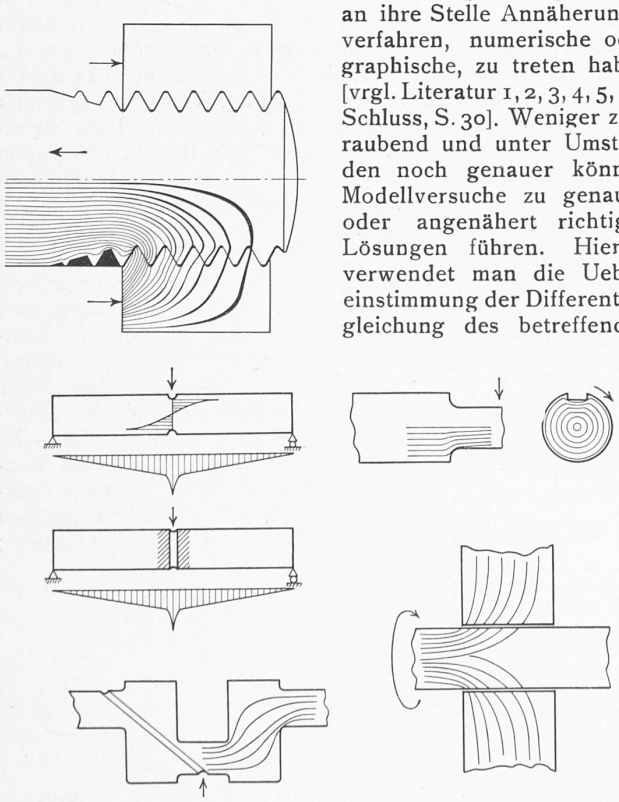


Abb. 1. Praktisch vorkommende Fälle von Kerbwirkung (Hauptspannungstrajektorien).

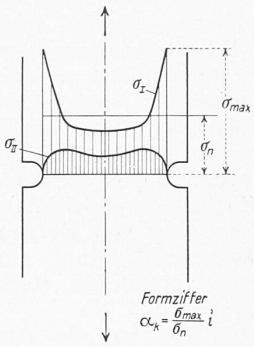


Abb. 2. Verteilung der Normalspannungen bei Zugbeanspruchung am gekerbten Stabe.

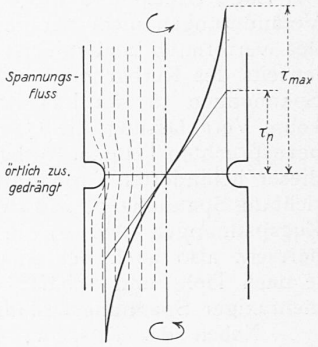


Abb. 3. Verteilung der Schubspannung bei Verdrehungsbeanspruchung am gekerbten Stabe.

Die Formziffer bei Verdrehbeanspruchung. Wegen der Konstanz des Volumens lässt sich bei Verdrehbeanspruchung, insbesondere bei rotationssymmetrischen Körpern (Welle mit Bund, Hohlkehle, Rundkerbe), die Formziffer mit Hilfe von Strömungmodellen verhältnismässig leicht und genau ermitteln (Abb. 3) [6, 7]. Bei prismatischen Körpern (z. B. Welle mit einer oder mehreren Keilnuten) führen, wenn auch umständlicher, gleichfalls Strömungsmodelle und ausgelenkte Membranen zum Ziel [8, 9, 10].

In Tafel 1 (S. 26) sind die Formziffern $\alpha_k = \frac{\tau_{max}}{\tau_n}$, wo $\tau_n = \frac{M}{W}$ die unter Annahme linearen Spannungsanstieges ermittelte Grösstspannung bei Verdrehung (die sogenannte Nennspannung) ist, für in der Technik häufig vorkommende Kerbformen angegeben. In Tafel 2 (S. 26) sind die Formziffern und damit die Grösstwerte der Torsionsspannung bei Rundkerben verschiedener Art enthalten. Daraus erkennt man die allgemein gültige Gesetzmässigkeit: 1. die Formziffer wächst mit wachsender Tiefe, 2. die Formziffer wächst mit abnehmendem Radius.

Die Formziffer bei Normalbeanspruchung. Im Gegensatz zu dem Verhalten bei Verdrehbeanspruchung bleibt bei Normalbeanspruchung (Zug, Druck, Biegung) das Volumen des beanspruchten Teiles nicht mehr konstant, und ein Vergleich der Beanspruchung z. B. mit Strömungsvorgängen ist deshalb hier nicht mehr möglich. Ausser Feindehnungsmessungen [11, 12, 20] mit sehr kleinen Messlängen sind bisher nur polarisationsoptische Verfahren mit einigem Erfolge und zwar nur an Flachstäben angewandt worden [13 bis 19]. Bei räumlichen Beanspruchungsfällen konnten die Formziffern und die Spannungsverteilung bisher auch noch nicht angenähert genau bestimmt werden. In Tafel 3 (S. 27) sind für einige Kerbformen die meist spannungsoptisch an Flachstäben erhaltenen Formziffern $\alpha_k = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_n}$, wo $\sigma_n = \frac{M}{W}$ bzw. $= \frac{P}{f}$ ist, zusammengestellt.

Vermutlich als Folge der Mehraxigkeit liegen bei Normalbeanspruchung bei der gleichen Kerbe die Werte der Formziffern höher als bei Verdrehbeanspruchung (vgl. Tafel 1 und 2); diese Werte beziehen sich auf Spannungen in der Hauptlastrichtung. In ihr haben wir also Grösstspannungen im Kerbgrunde, die je nach Art der Kerbe mehr oder weniger schnell nach der Mitte zu abnehmen. Der äussere gleichmässige (homogene) Spannungszustand wird also in der Gegend der Kerbe ungleichmässig (inhomogen). Mit den Längsdehnungen sind durch die Poisson'sche Zahl bestimmte Querzusammenziehungen verknüpft. Bei Zug-, Druck- und Biegebeanspruchung treten dadurch Veränderungen nicht nur des Querschnittes, sondern auch des verformten Stabvolumens auf. Da die Aussengebiete jenseits des Kerbgrundes keine oder nur äusserst geringe Spannungen in der Lastrichtung aufnehmen, haben sie keine Veranlassung, die Querzusammenziehung der hochbeanspruchten Teile im Kerbgrunde mitzumachen. Als Folge dieser behinderten Formänderung entstehen quer zur Lastrichtung Spannungen, und zwar bei Zugbelastung gleichfalls Zugspannungen (Abb. 2). In der Umgebung von Kerben herrscht also auch bei einaxiger äusserer Belastung ein je nach Tiefe und Schärfe der Kerbe verschieden stark mehraxiger Spannungszustand.

Neben der Tatsache, dass durch Kerben aller Art im Kerbgrunde hohe Spannungsspitzen in Lastrichtung auftreten können, ist also der gekerbte Zustand gekennzeichnet durch örtliche Ungleichmässigkeit (Inhomogenität) und bei Normalbeanspruchung durch Mehraxigkeit des Spannungszustandes auch bei homogener linearer Belastung. Der Grad der Ungleichmässigkeit (Inhomogenität) und der Mehraxigkeit bei verschiedenen Kerben ist dabei von ausschlaggebender Bedeutung (vgl. folgenden Absatz).

Die Kerbe beim Uebergang von elastischer zu plastischer Verformung. Wie neuere Untersuchungen gezeigt haben, ist der Uebergang vom elastischen Verformungsgebiet zum plastischen im einzelnen nicht allmählich, sondern sprungweise, quantenhaft; die geflossenen Teile fliessen sofort plastisch bis zur beginnenden Verfestigung [21, 22]. Der allmähliche Uebergang wird nur bei makroskopischer Betrachtungsweise als Gesamtwirkung der sprunghaften Einzelvorgänge erhalten. Ein Fliessen kann deshalb

Kerbform	Abmessungen		Formziffer α_k
Abgesetzte Welle	$\frac{d}{D} = 0{,}5$	$\frac{\varrho}{d} = 0{,}01$	3,00
		0,02	2,50
		0,04	2,15
		0,10	1,50
	$\frac{d}{D} = 0{,}8$	$\frac{\varrho}{d} = 0{,}01$	2,60
		0,02	2,30
		0,04	1,90
		0,10	1,45
	$\frac{d}{D} = 0{,}95$	$\frac{\varrho}{d} = 0{,}01$	1,8
		0,02	1,5
		0,04	1,3
		0,10	1,2
Welle mit Keilnut	$\varrho << D$		2,0
	$\varrho = 0{,}5t$	$t = 0{,}1D$	2,1

Tafel 1. Formziffern bei Torsion für verschiedene Kerben.

Kerbform	Abmessungen		Formziffer α_k
Rundnut	$\frac{d}{D} = 0{,}6$	$\frac{\varrho}{d} = 0{,}01$	3,4
		0,02	2,9
		0,04	2,5
		0,08	2,3
		0,12	2,2
	$\frac{d}{D} = 0{,}7$	$\frac{\varrho}{d} = 0{,}01$	3,1
		0,02	2,8
		0,04	2,4
		0,08	2,2
		0,12	2,1
	$\frac{d}{D} = 0{,}8$	$\frac{\varrho}{d} = 0{,}01$	2,8
		0,02	2,6
		0,04	2,2
		0,08	2,0
		0,12	1,9
	$\frac{d}{D} = 0{,}9$	$\frac{\varrho}{d} = 0{,}01$	2,4
		0,02	2,2
		0,04	2,0
		0,08	1,7
		0,12	1,6

Tafel 2. α_k bei verschiedenen Rundkerben.

nur in zusammenhängenden Schichten auftreten, also nur dann, wenn für die Nachbarteilchen eines überbeanspruchten gleichfalls die Fliessbedingungen erfüllt sind, da ein Einzelfliessen bis zum Verfestigungsbeginn den Werkstoffzusammenhang zerstören würde [23]. Diese Erkenntnis ist bei gleichmässiger Spannungsverteilung (Zugversuch an glatten Stäben) ohne Belang, nicht aber bei stark ungleichmässiger. Hier wird das Material an den hochbeanspruchten Spannungsspitzen durch die weniger beanspruchte Umgebung am Fliessen gehindert. Starke Ungleichmässigkeit der Spannungen (Inhomogenität) stellt also eine Fliessbehinderung dar, die an gekerbten Stäben erhebliche Werte annehmen kann (Abb. 4). In Zahlentafel 4 ist die Formabhängigkeit des Fliessbeginnes an einigen Beispielen gezeigt. Besonders tritt dies dann in Erscheinung, wenn der beanspruchte Querschnitt derart ist, dass nur geringe Querschnittsteile im überbeanspruchten Gebiete liegen, während der grössere Teil nur unter geringer Spannung steht (Aushilfsstellung). Zahlentafel 5 zeigt, dass selbst bei ungekerbten Stäben lediglich durch die durch Biegung erzeugte Ungleichmässigkeit (Inhomogenität) starker Fliessverzug bei solchen Querschnitten auftritt [23]. Aus diesem Grunde liegt allgemein bei Stahl und den übrigen dehnbaren Werkstoffen die Biegestreckgrenze höher als die Zugstreckgrenze; das Verhältnis beider hängt aber ausser vom Werkstoff stark von der Form ab. Versuche in letzter Zeit haben insbesondere gezeigt, dass bei Dauerstandversuchen Kerben einen günstigen, fliessbehindernden Einfluss aufweisen (Abb. 5) [24], und dass bei Dauerstandbiegeversuchen ganz entspechend den eben geschilderten Verhältnissen erheblich grössere Kriechbehinderung erhalten wird als im Zugversuch (Abb. 6) [25].

Ausser Ungleichmässigkeit der Spannungsverteilung bewirkt auch ihre Mehraxigkeit eine Behinderung des Fliessens, das bei gleich hoher Grösstspannung in Lastrichtung wegen der auftretenden Querspannung abnimmt, wie aus der in Abb. 7 angegebenen Darstellung nach Mohr leicht zu erkennen ist. Mit wachsendem Grad der Mehraxigkeit schrumpft der Mohr'sche Kreis immer mehr. Da keine nennenswerten Schubspannungen vorhanden sind, wird das Gleitvermögen des Werkstoffs nicht beansprucht;

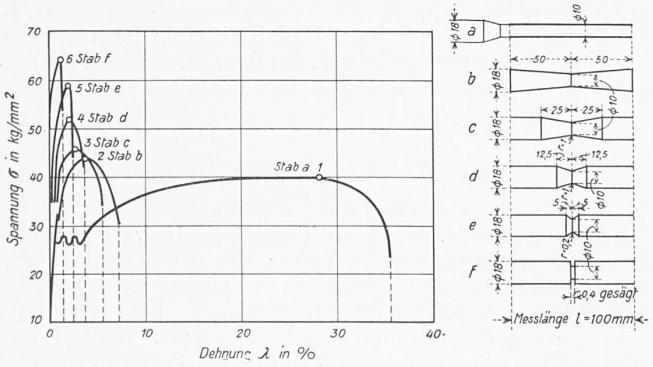


Abb. 4. Fliessgrenze bei verschieden gekerbten Stahlstäben.

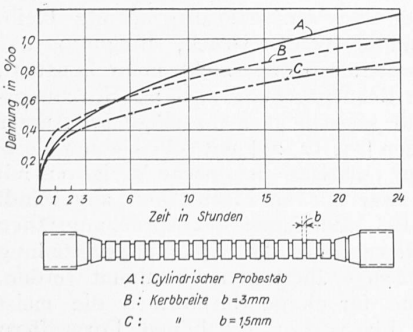


Abb. 5. Dehnungs-Zeitkurve für gekerbten und ungekerbten Dauerstandzugstab aus Molybdänstahlguss ($\sigma = 26$ kg/mm², $T = 400\,^0$ C).

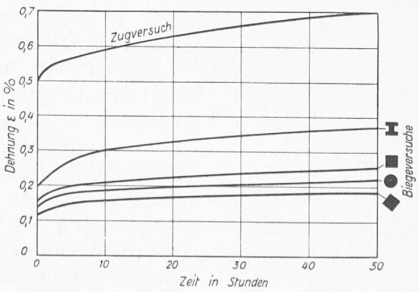


Abb. 6. Dehnungs-Zeitkurve bei Dauerstandzug- und Biegeversuchen (St C 35.61) $\sigma_z = \sigma_b = 22$ kg/mm²; $T = 400\,^0$ C.

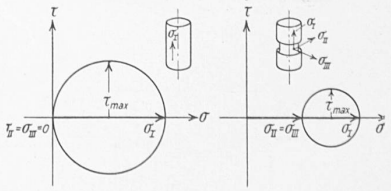
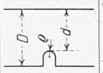
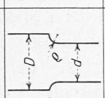
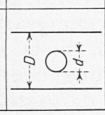
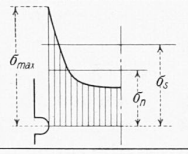


Abb. 7. Grösse der Schubspannung bei gleichgrosser einaxiger und mehraxiger Zugbeanspruchung (Mohr'sche Darstellung).

Beanspruchung	Kerbform	Abmessungen	Formziffer α_k
Biegung		$\frac{d}{D}=0{,}6$ $\frac{\varrho}{d}=0{,}02$	3,3
		0,1	2,6
		0,2	2,1
		0,3	1,9
		$\frac{d}{D}=0{,}8$ $\frac{\varrho}{d}=0{,}02$	2,9
		0,1	2,2
		0,2	1,8
		0,3	1,6
		$\frac{d}{D}=0{,}95$ $\frac{\varrho}{d}=0{,}02$	2,4
		0,1	1,7
		0,2	1,5
		0,3	1,3
Zug		$\frac{d}{D}=0{,}5$ $\frac{\varrho}{d}=0{,}1$	3,5
		0,2	2,3
		0,3	2,0
		$\frac{d}{D}=0{,}7$ $\frac{\varrho}{d}=0{,}05$	3,7
		0,1	2,3
		0,2	1,7
		0,3	1,5
		$\frac{d}{D}=0{,}9$ $\frac{\varrho}{d}=0{,}02$	3,5
		0,05	2,1
		0,1	1,5
		0,2	1,3
		0,3	1,2
Zug		$\frac{d}{D}=0{,}3\div0{,}7$ $\frac{\varrho}{d}=0{,}05$	2,8
		0,1	2,4
		0,2	1,9
		0,3	1,7
		0,4	1,6
		0,5	1,5
Biegung		$\frac{d}{D}=0{,}3\div0{,}7$ $\frac{\varrho}{d}=0{,}03$	2,2
		0,07	1,9
		0,1	1,7
		0,2	1,55
		0,3	1,45
		0,4	1,35
		0,5	1,25
Zug		$\frac{d}{D}=0$	3,0
		0,1	2,75
		0,2	2,55
		0,3	2,4
		0,5	2,2
		0,7	2,0

Tafel 3. Formziffern für verschiedene Kerben bei Normalbeanspruchung.

Kerbform	Erstes Fliessen im Kerbgrund σ_{n_1}	Erstes Fliessen im Kerbgrund σ_{max}	Fliessen des ganzen Kerbquerschnitts σ_{n_2}	Formziffer nach Preuss α_k	Aus dem Fliessbeginn ermittelte Auswirkung der Kerbe σ_s/σ_{n_1}
	20,8	124	–	5,95	1,48
	19,8	103	30,9	5,18	1,56
	16,3	85	32,8	5,18	1,89
	16,0	34	29,1	2,14	1,92
	18,9	47	30,6	2,50	1,64
	24,8	44	32	1,78	1,24



An der Spannungsspitze nur elastische Verformung trotz Überschreiten der Streckgrenze

Tafel 4. Abhängigkeit des Fliessbeginnes von der Form bei Zugversuchen (nach Thum und Wunderlich).

Querschnittsform	Biegefliessgrenze kg/mm²	Zugfliessgrenze kg/mm²
□	35 ÷ 36	28
○	44	28
◇	45	28

Tafel 5. Abhängigkeit der Biegefliessgrenze von der Querschnittsform (Zugstreckgrenze als Vergleich).

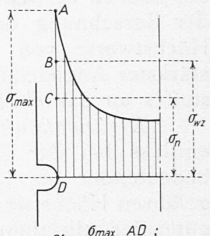
bei scharfen Kerben wird daher bei Steigerung der Belastung kein Fliessen, sondern schliesslich ein Trennen des Werkstoffes eintreten [26].

Die verschiedenen Stähle haben am glatten zylindrischen Probestab eine verschieden starke Neigung zum Fliessen, je nach der Grösse des Gleitwiderstandes. Der Bruch erfolgt bei niedrigem Gleitwiderstand und hoher Kohäsion (hoher Trennfestigkeit) erst nach erheblicher plastischer Verformung, die bei zähem Stahl mit einer Gleitflächen-Blockierung und damit einer Verfestigung verbunden ist. Liegt dagegen der Gleitwiderstand hoch oder ist er sogar grösser als der Trennwiderstand, so tritt keine plastische Verformung, sondern sofort eine Zerstörung des Zusammenhanges im Trennungsbruch ein (spröder Stahl, Gusseisen). Durch den Formeinfluss kann selbst bei zähen Werkstoffen der Fliesswiderstand so gehoben werden, bzw. die wirkende Schubspannung so gesenkt werden, dass Trennungsbrüche, also sprödes Verhalten, auftreten.

Mit Hilfe von Kerben kann daher sowohl die Zähigkeit als auch die Kohäsion eines Werkstoffes, seine Trennfestigkeit geprüft werden. Die Zähigkeitsprüfung erfolgt gewöhnlich durch die Schlagprobe (Zug oder Biegung) an scharf gekerbten Prüfstäben und ist als Abnahmeprobe überall eingeführt. Die Kohäsionsprüfung dagegen beginnt erst jetzt langsam Eingang in die Prüftechnik zu finden, obwohl gerade aus ihr wichtigste Schlüsse auf das Verhalten des Werkstoffes gezogen werden können. Man bestimmt dazu die Trennfestigkeit als Extrapolationswert aus Kerbversuchen mit immer tiefer werdenden Kerben. (Ueber die Prüftechnik vergleiche die Veröffentlichungen von W. Kuntze.) Die Zugfestigkeit steigt am gekerbten Stabe dabei umso höher, je weitergehend die Fliessbehinderung ist und erreicht bei unendlich scharfer Kerbe (Extrapolationswert) denjenigen natürlichen Grenzwert, der durch den Zusammenhalt, die Kohäsion, der Werkstoffteile gegeben ist [26].

Die Kerbe bei wechselnder Beanspruchung. Bei zügiger Beanspruchung zeigt sich allgemein bei zähen Werkstoffen eine Steigerung der Festigkeit durch den durch die Kerbe verursachten mehraxigen und ungleichmässigen Spannungszustand. Bei Beanspruchungen mit zeitlich veränderlicher Grösse und Richtung der Last ist ein ähnliches Verhalten festzustellen, nämlich dann, wenn man die Bruchgefahr aus der Lage der mit Hilfe des Hooke'schen Gesetzes ermittelten Spannungsspitze zur Dauerfestigkeit am glatten polierten Probestabe beurteilt (Abb. 8) [27, 28, 36].

Mit Hilfe der vereinfachenden Annahmen der elementaren Festigkeitslehre (gleichmässige bezw. linear ansteigende Spannung) wird die Nennspannung CD in Abb. 8 aus der äussern Belastung und dem Querschnitt bzw. Widerstandsmoment des Probestabes ermittelt. Die anfangs angegebenen experimentellen Methoden gestatten, zu einer von der zylindrischen Form abweichenden Berandung die dadurch, bei Gültigkeit des Hooke'schen Gesetzes, verursachte Höchstspannung AD bzw. die Formziffer anzugeben. Die Annahme, dass dann die Dauerfestigkeit überschritten ist, wenn diese Spannungsspitze $\sigma_{max} = \alpha_k \sigma_n$ (Strecke AD) σ_{wz}, also BD übersteigt, ist nicht richtig. Vom Werkstoff können vielmehr je nach seiner Art und der Form der Kerbe verschieden grosse Ueberspannungen AB aufgenommen werden [32 bis 35]. Durch die Art des verwandten Werkstoffes ist die Grösse der Wechselfestigkeit, z. B. auf Zug, $\sigma_{wz} = BD$ von vornherein vorgegeben. Gesucht ist diejenige Nennspannung $\sigma_{n\,zul} = CD$, die von dem Werkstoff bei der betr. Kerbform gerade noch dauerbruchsicher aufgenommen wird. Zur Auswirkung kommt je nach Art des Werkstoffes und Inhomogenität bzw. Mehraxigkeit des Spannungszustandes im Kerbgebiet nicht die volle Grösse der Spannungsspitze $AC = \sigma_{n\,zul}\,(\alpha_k - 1)$, sondern nur ein kleinerer Wert $BC = \sigma_{n\,zul}\,(\beta_k - 1)$, worin β_k die sogenannte Kerbwirkungszahl darstellt: Das Verhältnis



$$\alpha_k = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_n} = \frac{AD}{CD}\,i$$

$$\beta_k = \frac{\sigma_{wz}}{\sigma_n} = \frac{BD}{CD}\,i$$

$$\eta_k = \frac{\beta_k - 1}{\alpha_k - 1} = \frac{BC}{AC}\,i$$

Abb. 8. Kerbwirkung und Kerbempfindlichkeit.

$$\frac{BC}{AC} = \frac{\sigma_{n\,zul}\,(\beta_k - 1)}{\sigma_{n\,zul}\,(\alpha_k - 1)} = \frac{\beta_k - 1}{\alpha_k - 1} = \eta_k\,,$$

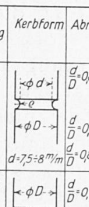
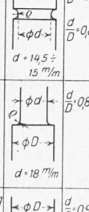
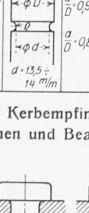
das unabhängig von der Grösse der Nennspannung ist, ist ein Mass für die Kerbempfindlichkeit, und wir bezeichnen deshalb η_k als Kerbempfindlichkeitszahl. Die Grösse von η_k hängt dabei ausser vom Werkstoff von dem durch die Kerbform erzeugten Spannungszustand bzw. der dadurch bedingten Fliessbehinderung ab [29, 30].

Der Dauerbruch entsteht dadurch, dass durch die im Kerbgrunde herrschenden wechselnden Spannungen plastische Verformungen von nicht mehr zulässiger Grösse entstehen. Ueberschreiten die bleibenden Verformungen, die in wechselnder Richtung erfolgen, einen bestimmten Betrag, den wir als bleibende Grenzgleitung bezeichnen wollen, so behält in dem mit beginnender bleibender Wechselverformung einsetzenden Widerstreit der verfestigenden Wirkung (Wechselverfestigung) mit der die Kohäsion zerrüttenden, diese die Oberhand. Wird die Grenzgleitung überschritten, so tritt die Kohäsionszerrüttung und damit der Dauerbruchansatz früher ein, als der Werkstoff durch die hin- und hergleitende Bewegung verfestigt werden kann. Die Grösse der Grenzgleitung und die Verfestigungsfähigkeit des Werkstoffes durch Hin- und Hergleiten hängt von dessen Gleit- und Trennwiderstand, also von der Lage der Fliessgrenze bei dem gegebenen Spannungszustand

zur Trennfestigkeit ab, sie ist also wieder bedingt durch Werkstoff und Form [31].

Durch die auf die Dauer ertragene Wechselgleitung, die also kleiner als die Grenzgleitung sein muss, wird ein gewisser Abbau der Spannungsspitze ermöglicht, eine Tatsache, die weniger bei Zug- und Biegebeanspruchung von Bedeutung ist, als bei Verdrehbeanspruchung, wo keine Fliessbehinderung durch Mehraxigkeit, sondern nur durch Spannungsungleichmässigkeit auftritt. Aus dem Gesagten ist eine verhältnismässig starke Abhängigkeit der Kerbempfindlichkeit von der Kerbform zu erwarten. Noch nicht genügend überprüfte neuere Versuche lassen ferner ein Ansteigen von η_k mit wachsender Probenstärke vermuten. Zahlentafel 6 zeigt die aus Dauerversuchen mit Hilfe der oben angegebenen Beziehung erhaltenen Werte für umlaufende Kerben. Man sieht, dass scharfe Kerben mit starker Ungleichmässigkeit der Spannungen und dadurch bewirkter Fliessbehinderung eine viel weitergehende Kerbentlastung gestatten, als tiefe Kerben mit einer grösseren Mehraxigkeit des Spannungszustandes. Höchstwerte von η_k ergeben sich bei Halbrundkerben mit einem Radius von etwa $^1/_{10}$ des Kerbdurchmessers. Falls man über keine genaueren Kerbempfindlichkeitswerte für die betreffende Konstruktionsform bei dem zu verwendenden Werkstoff verfügt, geht man mit der Berechnung daher bestimmt sicher, wenn man diese Höchstwerte von η_k verwendet, da sie etwa den Fall stärkster Angleichung des wirklichen Verhaltens des Werkstoffes an das elastizitätstheoretische darstellen.

Kerbempfindlichkeit als Güteziffer. Da der Werkstoffeinfluss bei der Grösse der Kerbempfindlichkeit ein sehr bedeutender ist, liegt es nahe, den oben erkannten ungefähren Höchstwert der Kerbempfindlichkeit als Werkstoffgüteziffer einzuführen. Man erhält in dieser Weise eine sehr gute Uebersicht über die Eignung der Werkstoffe für stark gekerbte, wechselbeanspruchte Maschinenteile [30]. Wenn man dabei weiter noch berücksichtigt, dass mit wachsender Kerbempfindlichkeit im allgemeinen auch eine wachsende Empfindlichkeit gegen Oberflächenbeschädigung (Walzhaut, Bearbeitungsriefen usw.) einhergeht, so verschiebt sich häufig das Bild sehr zu Gunsten mittlerer nicht hoch gezüchteter Stähle (Tafel 7). Stähle mit besonders hochliegender Streckgrenze werden daher sinnvoll nur bei geringer Kerbwirkung, hochwertiger Oberfläche und starker statischer Vorspannung verwandt, da nur dies die Wahl einer hohen Streckgrenze berechtigt erscheinen lässt.

Beanspruchung	Kerbform	Abmessungen	Formziffer α_k	Kerbwirkungszahl β_k	Werkstoff	Kerbempfindlichkeitsziffer η_k
Biegung		$\frac{d}{D}=0{,}835$ $\frac{\varrho}{d}=0{,}167$	1,7	1,37	St 37.11 Mat. A	0,53
		0,1	2,0	1,63		0,63
		$\frac{d}{D}=0{,}75$ $\frac{\varrho}{d}=0{,}1$	2,4	1,81		0,68
	$d=7{,}5\div8$ m/m	$\frac{d}{D}=0{,}84$ $\frac{\varrho}{d}=0{,}031$	2,6	1,78		0,49
Biegung		$\frac{d}{D}=0{,}9$ $\frac{\varrho}{d}=0{,}052$	2,3	2,13	St 37.11 Mat. B	0,87
	$d=14{,}5\div15$ m/m	$\frac{d}{D}=0{,}835$ $\frac{\varrho}{d}=0{,}1$	2,0	1,67		0,67
Biegung	 $d=18$ m/m	$\frac{d}{D}=0{,}835$ $\frac{\varrho}{d}=0{,}0415$	2,0	1,61	=	0,61
Verdrehung	$d=13{,}5\div14$ m/m	$\frac{d}{D}=0{,}9$ $\frac{\varrho}{d}=0{,}052$	1,8	1,52	=	0,65
		$\frac{d}{D}=0{,}84$ $\frac{\varrho}{d}=0{,}093$	1,8	1,32		0,40

Tafel 6. Kerbempfindlichkeit η_k bei verschiedenen Kerbformen und Beanspruchungen.

Die Kerbe bei Stoss- und Zusatzbeanspruchungen durch Zwangsverformung. Schlagbeanspruchungen sind bei manchen Maschinenteilen unvermeidbar, da ihr konstruktiver Zweck sie fordert oder sonstige ungleichmässige Betriebsbedingungen sie ergeben; in vielen Fällen ist ferner durch eintretendes Spiel, durch Verschleiss, durch Lockerung nach einer gewissen Betriebszeit mit Schlagbeanspruchung statt mit Schwingungsbeanspruchung zu rechnen. In diesen Fällen muss durch konstruktive Massnahmen dafür gesorgt werden, dass die Schlagkräfte klein bleiben. Das ist dann der Fall, wenn die Schlagenergie längs eines grösseren Dehnweges allmählich in elastische Verformungsarbeit umgesetzt wird, d. h. wenn die Konstruktion nicht starr ist, sondern genügend weiche und grosse Dehnglieder besitzt. In Abb. 9 sind einige Fälle schematisch dargestellt. Man sieht daraus, dass Kerben bei Schlagbeanspruchung noch weit gefährlicher als bei Schwingungsbeanspruchung sind, da sie hier nicht nur eine Zusammendrängung der Spannungslinien, sondern wegen der Erhöhung der Schlagkraft auch gleichzeitig eine Erhöhung der Nennspannung bewirken [42].

Werkstoff	Zugfestigkeit σ_B kg/mm²	Biegewechselfestigkeit σ_n' kg/mm²	Empfindlichkeitsziffer η_k
Baustahl 37	44,3	22,3	0,65
Baustahl 52	59,5	38,4	0,85
Stahl 60	59,7	31,8	0,5
Stahl 60	61,8	30,0	0,6
Stahl 70	74,3	35,2	0,6
VCN 35, geglüht	67,6	42,0	0,6
Mn-Federstahl, vergütet . .	116	58,8	0,95
V1M, vergütet	74,8	40,4	0,5
V4Aw	59,5	25,3	0,0

Tafel 7. Die Kerbempfindlichkeit als Güteziffer bei verschiedenen Werkstoffen.

Ganz ähnliche Verhältnisse liegen bei Beanspruchungen vor, die durch Zwangsverformungen erzeugt werden. Grosse Steifigkeit des Konstruktionsteiles hat bei vorgegebenem Verformungsbetrag (etwa durch verschieden starke Erwärmung oder durch zusätzliche Biegung usw.) hohe Spannungen zur Folge. Sind z. B. die Sitzflächen von Schraubenkopf und Mutter nicht parallel, so muss die Schraube durch eine bestimmte vorgegebene Verbiegung den Zusammenbau ermöglichen. Dadurch werden in ihr Biegespannungen auftreten, die umso grösser sind, je steifer die Schraube ist. In Abb. 10 sind der kurzen, dicken Schraube solche mit eingezogenem Schaft und mit künstlich vergrösserter Dehnlänge (durch Zwischenschalten einer Hülse) gegenüber gestellt, die sich bei Aufnahme von Zwangsverformungen und bei Schlagbeanspruchung günstiger erweisen. Diese Betrachtungsweise ist insbesondere im Gehäusebau, bei Rippenkonstruktionen usw., also überall dort anzuwenden, wo Verformungen vorgegeben sind, die je nach der Steifigkeit der Konstruktion verschieden grosse Spannungen erzeugen werden [42].

Steigerung der Dauerhaltbarkeit bei konstruktiv gegebener Kerbwirkung. Wenn irgend möglich soll der Konstrukteur durch allmähliche Uebergänge, grosse Ausrundung

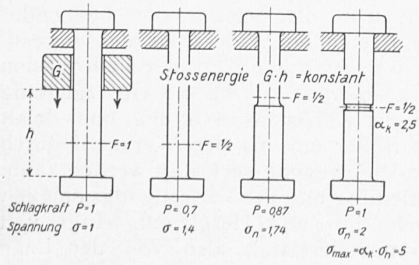


Abb. 9. Schlagbeanspruchung und Steifigkeit.

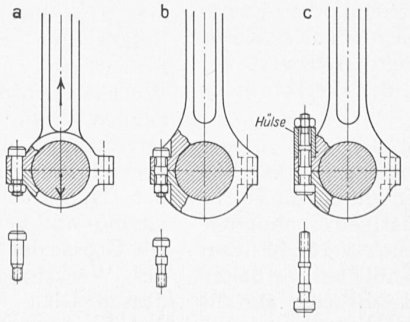


Abb. 10. Vermeidung von Zusatzspannungen durch Zwangsverformung.

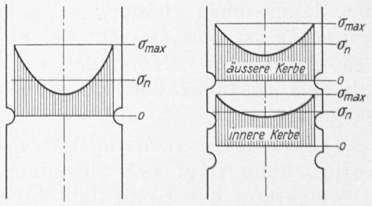
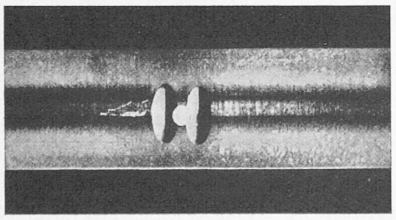


Abb. 11. Die Wirkung von an der Mitte angebrachten Entlastungskerben auf die Dauerhaltbarkeit von Schraubenverbindungen.

usw. Kerben in seiner Konstruktion vermeiden, namentlich dann, wenn sie schwingender oder gar schlagartiger Dauerbeanspruchung ausgesetzt ist. In vielen Fällen erfordert aber der konstruktive Zweck eine bestimmte Kerbung, z. B. eine Querbohrung als Schmierloch, einen Bund mit axialer Anlage des aufgesetzten Teiles, eine Einspannstelle mit aufgesetzter Kupplung oder mit aufgesetzter Schwungscheibe usw. [38]. In diesen Fällen kann man versuchen, den Fluss der Lastspannungen auszugleichen etwa durch Hinzufügen weiterer Kerben als Entlastungskerben (Abb. 11 und 12). In vielen Fällen reicht die so durch Minderung der Lastspannungsspitze in Lastrichtung erzielte Herabsetzung der Dauerbruchgefahr aus, um gerade noch die gewünschte Belastung dauerbruchsicher aufzunehmen bzw. zu übertragen [39]. Müssen aber erheblich grössere Beanspruchungen ertragen werden, als der gekerbten Stelle zugemutet werden kann (30 bis 40 % und mehr), dann kann dies nur noch durch Schaffung eines günstigeren räumlichen Spannungssystemes und gleichzeitigen Abbau schädlicher Zugspannungsspitzen durch künstlich aufgebrachte Eigenspannungen geschehen [39, 40]. Eine Verstärkung der ganzen Konstruktion wegen einer einzigen gefährlichen Kerbstelle ist aus Gründen des Leichtbaues und der Wirtschaftlichkeit abzulehnen. Im Gegenteil ist auch bei gekerbten Konstruktionsteilen die Forderung nach möglichst gleichmässiger Ausnutzung des verwandten Werkstoffes zu erheben. Das künstlich aufgebrachte Eigenspannungssystem muss so beschaffen sein, dass es mit den Lastspannungen zusammengesetzt, eine erhöhte Räumlichkeit und Ungleichmässigkeit (Inhomogenität), also eine erhöhte Fliessbehinderung bewirkt und so den Gesamtspannungszustand, der aus Lastspannung und Eigenspannung resultiert, weiter von der Dauerfestigkeitsgrenze entfernt [40]. Die Erzeugung der künstlichen Eigenspannungen geschieht durch äussere Einwirkung (Kaltverformung, verschieden starke Erwärmung) so, dass in ein und demselben Teil verschieden grosse bleibende Dehnungen erzeugt werden. Die stärker gedehnten Teile werden dann mit elastischen Druckeigenspannungen behaftet sein (Abb. 13). Verfahren, bei denen ein möglichst räumliches Eigenspannungssystem erzeugt wird (Walzen, Drücken), weil bleibende Verformungen in mehreren Richtungen auftreten, sind aus den oben geschilderten Gründen besser geeignet als z. B. Recken, wobei nur in Lastrichtung Eigenspannungen erzeugt werden, weil die Querspannungen an der Kerbe kleiner als die Längsspannungen sind. Ein möglichst räumliches Eigenspannungssystem wird sich gleichfalls wegen der grösseren Fliessbehinderung im Betriebe erhalten können, während ein einaxiges dann schon abgebaut wird,



Nr.	[Biegewechselfestigkeit des Wellenwerkstoffs: $\sigma_W' = 24\ kg/mm^2$]	Tragfähigkeit (Nennspannung) kg/mm^2	Kerbwirkungszahl β_k $(1/\beta_k)$	Steigerung der Tragfähigkeit gegenüber 1 in %
1	Welle mit Bohrung	15,1	1,59 (0,63)	—
2	Welle mit Bohrung und Entlastungskerben	16,9	1,42 (0,7)	12
3	Welle mit Bohrung und Druckvorspannung	21,5	1,12 (0,89)	42
4	Entlastungskerben und Druckvorspannung	29,8	0,805 (1,24)	97,5

Tafel 8. Milderung der Kerbwirkung bei Wellen mit Querbohrung durch Entlastungskerben und Eigenspannungen.

wenn Eigenspannungen und Betriebsspannungen die Werkstoffstreckgrenze überschreiten.

Durch Kaltverformung erzeugte Eigenspannungen haben vor den durch verschieden starke Erwärmung erhaltenen einen weiteren Vorzug. Bei der Kaltverformung treten nämlich grössere Gleitwege und damit eine stärkere Werkstoffverfestigung auf, als deren Folgen ein nochmals erhöhter Fliesswiderstand und erhöhte Werkstoffdauerfestigkeit zu erwarten sind. Während bei Zug- und Biegebeanspruchung durch die Kerbe eine Mehraxigkeit des Spannungszustandes entsteht, die durch das Eigenspannungssystem verstärkt werden soll, ist dies bei Verdrehung nicht der Fall. Hier wird sich vor allem die grössere Ungleichmässigkeit der Lastspannung und die durch Kaltverformung erhöhte Streckgrenze und Dauerfestigkeit günstig bemerkbar machen.

Besonders grosse Steigerungen der Dauerhaltbarkeit ergeben sich, wenn man die Wirkung von Entlastungskerben und Eigenspannungen dadurch vereinigt, dass man in den schon durch Drücken oder Walzen mit Eigenspannung versehenen Probestab zusätzlich Entlastungskerben einpresst bzw. einwalzt. Das Verfahren muss aber in jedem Falle so gewählt werden, dass sich die nacheinander erzeugten Eigenspannungen unterstützen (Abb. 12 und 13). Das Aufbringen der Eigenspannungen durch Kaltverformung geschieht bei rotationssymmetrischen Gebilden am besten durch Walzen mittels Profilwalzen, bei nicht rotationssymmetrischer Kerbform, wie z. B. bei der Querbohrung, muss man das Walzen ersetzen durch Drücken mit Stempel in einer Richtung [40]. Um am Lochrande Druckspannungen zu haben, muss man in Richtung des Loches drücken (Abb. 14). Die Stempelform ist nicht unbedingt festgelegt; Flachstempel von nicht sehr grossem Durchmesser

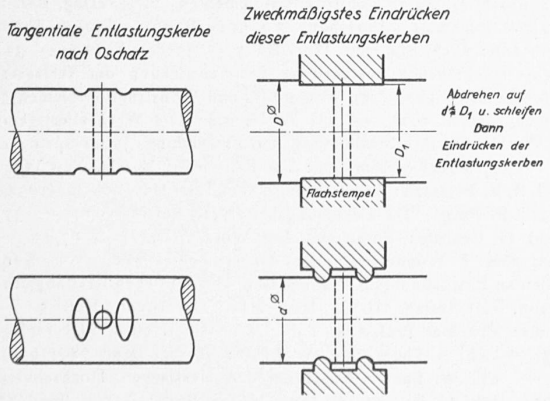


Abb. 12. Entlastungskerben an der Welle mit Querbohrung.

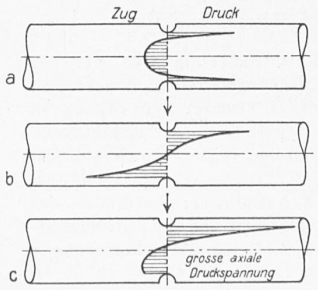


Abb. 13. Lastspannungen und Eigenspannungen in Axenrichtung bei gebogenem und gekerbtem Stabe und ihre Ueberlagerung.

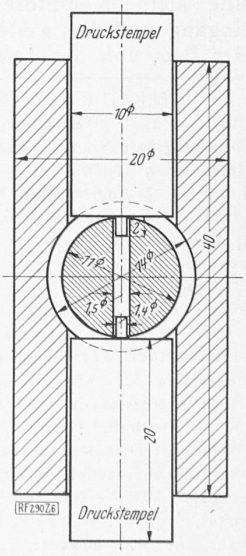


Abb. 14. Vorrichtung und Aufbringung von günstigen Eigenspannungen durch Drücke an quergebohrten Wellen.

Abb. 1 und 2. Ecke Theaterstrasse-Urbangasse mit prov. Reklamewand, bei Tag und bei Nacht.

Abb. 3. Freieckgasse, gegen Hotel und Durchfahrt.

(0,5 bis 0,75 Wellendurchmesser) können im allgemeinen empfohlen werden. Die richtige Wahl der Stempelkraft ist von grösster Bedeutung: bei kleinen und sehr grossen Kräften bildet sich wegen mangelnder bzw. zu starker plastischer Verformung kein Eigenspannungssystem aus. Für schwierigere Fälle empfiehlt es sich, durch Vorversuche die günstigste Stempelkraft und Stempelform zu ermitteln. In Tafel 8 (S. 29) sind die Ergebnisse von solchen Versuchsreihen dargestellt und zum Vergleich auch andere Verfahren zur Erzeugung von Entlastungskerben bezw. Eigenspannungen mit ihren Ergebnissen herangezogen. Weitere Einzelheiten finden sich in dem am Fuss dieser Seite angeführten Schrifttum.

Hotel und Kino „Urban" in Zürich.

Arch. M. HAUSER, Bau-Ing. F. TAUSKY, Zürich.

Der Neubau „Urban" beim Bellevueplatz, mitten im Vergnügungszentrum Zürichs gelegen, enthält ein Lichtspieltheater von rd. 1150 Plätzen mit Eingang von der Theaterstrasse, ein Hotel garni mit rd. 60 Betten an der Stadelhoferstrasse, eine Gross-Kegelbahn unter dem Kino, ferner eine kleine Konditorei „Bonbonnière" neben dem Kinoeingang und drei weitere Läden an der Stadelhoferstrasse. Der Bau, von der Theaterstrasse, St. Urbangasse, Stadelhoferstrasse und Freieckgasse umrahmt, ist durch allerlei beengende Bauvorschriften sowie durch nachbarliche Behinderung zurzeit etwas eigenartig gegliedert: er beginnt mit bescheidenen Höhenmassen an der Theaterstrasse und entwickelt sich, allmählich ansteigend, erst im Stadelhoferquartier zu seiner vollen Höhe (Abb. 1 bis 5, und 8 bis 12).

Der Aufbau der Obergeschosse an der Theaterstrasse soll in einer spätern Bauetappe im Zusammenhang mit dem Nachbarhaus ausgeführt werden. Einstweilen wurde anstelle der Obergeschosse eine 13 m hohe und 7 m breite Plakat- und Lichtreklamewand erstellt, bei der auf die übliche Neonbeleuchtung verzichtet wurde. Sie besteht in einem von hinten angestrahlten Rost aus Blechlamellen, der durch geschickte Ausnützung von Reflexwirkungen des Nachts eine mild leuchtende Lichtwand ergibt (Abb. 1 u. 2).

Durch die offene Vorhalle mit ihren Schwebe-Vitrinen gelangt man in die helle Atmosphäre des Kassenraums. Wärmer und intimer ist die Stimmung im anschliessenden zweistöckigen Foyer mit seiner indirekten Voutenbeleuchtung, der Balkontreppe mit indirektem Licht unter dem Handlauf, dem Spannteppich. Der Theaterraum, breit und eiförmig konisch, wirkt trotz seiner Grösse intim durch Proportionen, Stoffe und Farbtönungen. Das Licht strömt aus Vouten über den Balkonen, Lichtbänder umziehen die Balkonlogen und die Bühnenumrandung. In der ganzen

LITERATUR-VERZEICHNIS: 1] F. A. Willers: Dissert. Göttingen 1907. — 2] C. Weber: Die Lehre von der Verdrehungsfestigkeit VDI Forschungsheft Nr. 249, Berlin 1921. — 3] A. Sonntag: Z. angew. Math. Mech. Bd. 9 (1929) S. 1. — 4] H. Neuber: Ing. Arch. 5 (1934) Nr. 3 S. 238/44, Z. Angew. Math. Mech, 13 (1933) S. 439. — 5] Th. Wyss: Die Kraftfelder in festen, elastischen Körpern, Verlag Springer, Berlin 1926.— 6] A. Thum und W. Bautz: Z. VDI 78 (1934), S. 17 und Arch. Techn. Mess. V. 132-11. — 7] L. S. Jacobsen: Trans. Americ. Soc. Mech. Engr. 47 (1925), S. 619. — 8] L. Prandtl: Phys. Z. 4 (1933), S. 506. — 9] H. Quest: Ing. Arch. 4 (1933), S. 506. — 10] H. Cranz: Ing. Arch. 4 (1933), S. 506. — 11] E. Preuss: Versuche über die Spannungsverteilung in gekerbten Zugstäben VDI-Forschungsheft 134. — 12] G. Fischer: Kerbwirkung an Biegestäben VDI-Verlag Berlin 1932. — 13] E. G. Cooker und L. N. G. Filon: A treatise on photoelasticity. Cambridge 1931. — 14] A. Thum und F. Wunderlich: Arch. Techn. Messen V 132-10. — 15] H. Cardinal v. Widdern: Diss. München 1928. — 16] E. Armbruster: Der Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit auf den Spannungsverlauf und die Schwingungsfestigkeit. VDI-Verlag, Berlin 1930. — 17] L. Kettenacker: Forschung 3 (1932), S. 71/78. — 18] F. Tank: SBZ 104 (1934), S. 45*. — 19] A. M. Wahl und R. Beeuwkes: Trans. Americ. Soc. Mech. Engr. APM 56-11, S. 617. — 20] F. Rötscher: Z. VDI-77 (1933), S. 373. — 21] F. Nakanischi: Reports Aeron Research. Inst. Tokyo Bd. 6 (1931), S. 83. — 22] W. Prager: Forsch. Ing. Wes. 4 (1933), S. 95. — 23] A. Thum und F. Wunderlich: Forschung Ing. Wes. 3 (1932), S. 261. — 24] A. Thum und H. Holdt: Giesserei 17 (1930), S. 333. — 25] H. Holdt: Schriften der Hess. Hochschulen 1934, Heft 3. — 26] W. Kuntze: Kohäsionsfestigkeit, Mitt. d. deutsch. Mat. Prüf. Anst. Sonderheft 20 (1932), daselbst Angabe über weitere Arbeiten des Verfassers. — 27] A. Thum und W. Buchmann: Dauerfestigkeit und Konstruktion. VDI-Verlag, Berlin 1932. — 28] E. Lehr: Spannungsverteilung in Konstruktionselementen. VDI-Verlag, Berlin 1934. — 29] W. Buchmann: Forschung 5 (1924), S. 36. — 30] A. Thum und W. Buchmann: Arch. Eis. Hütt. Wes. Bd. 7 (1933/34), S. 627. — 31] Vgl. demnächst erscheinende ausführliche Veröffentlichung der Verfasser. 32] O. Graf: Dauerfestigkeit der Werkstoffe und Konstruktionselemente. Julius Springer, Berlin, 1929. — 33] W. Herold: Die Wechselfestigkeit metallischer Werkstoffe, ihre Bestimmung und Anwendung. Julius Springer, Wien, 1934. — 34] Moore & Kommers: The Fatigue of Metals, New York, 1927. — 35] R. E. Peterson: Proc. Americ. Soc. Test. Mat. Vol. 32 (1932), S. 313. — 36] S. Berg; VDI-Forschungsheft 331, Berlin, 1930. — 37] A. Thum und H. Oschatz: Forschung Ing. Wes. 3 (1932), S. 87/93. — 38] A. Thum und F. Wunderlich: Die Dauerbiegefestigkeit von Konstruktionsteilen an Einspannungen, Nabensitzen und ähnlichen Kraftangriffsstellen. Berlin, VDI-Verlag, 1934. Mitt. MPA Darmstadt, Heft 5. — 39] H. Oschatz: Mitt. Mat. Prüf. Anst. T. H. Darmstadt, Heft 2, VDI-Verlag, Berlin, 1933. — 40] A. Thum und W. Bautz: Z. VDI Band 78 (1934), Seite 921. — 41] W. Bautz: Schriften der Hessischen Hochschulen Jahrgang 1934, Heft 3. — 42] A. Thum und S. Berg: Z. VDI Band 77 (1933), Seite 281.