

MITTEILUNGEN AUS DEM
INSTITUT FÜR MASCHINENWESEN
DER TECHNISCHEN UNIVERSITÄT
CLAUSTHAL

INSTITUTSDIREKTOR PROF. DR.-ING. A. KUSKE

Nr. 4/74

Numerische Spannungsberechnung ohne Groß-Computer

Prof. Dr.-Ing. A. Kuske

1. Problematik der numerischen Spannungsberechnung

Da die Spannungsberechnung mittels analytischer Verfahren nur in bestimmten Fällen möglich ist, dagegen für allgemeine Fälle versagt, wurden numerische Verfahren für diesen Zweck entwickelt. Dabei handelt es sich um zwei grundsätzlich verschiedene Arten von Verfahren, nämlich die Finite-Elemente-Methode und das Singularitäten-Überlagerungsverfahren. Das erste beruht darauf, daß das aus infinitesimalen Elementen bestehende Kontinuum durch finite Elemente ersetzt wird. Dadurch entsteht ein System mit endlichem aber meist noch recht hohem Grad von statischer Unbestimmtheit, was erst durch Anwendung entsprechender Computer lösbar wurde. Je komplizierter die Form eines Bauteils ist, desto mehr Elemente sind erforderlich, um diese Form mit vertretbarer Näherung darzustellen. Die Zahl der Unbekannten ist in solchen Fällen sehr hoch. Die Rechenzeit steigt in solchen Fällen etwa mit der 3. Potenz der Unbekannten. Sie wird also selbst für Groß-Computer problematisch. Ganz abgesehen von der finanziellen Seite, die damit verbunden ist [1,2]. Finite-Elemente-Verfahren, die mit weniger Rechenarbeit auskommen, sollen am Institut für Maschinenwesen entwickelt werden.

Es ist dabei an ein Verfahren gedacht, bei dem nach einem Vorschlag des Verfassers an Stelle statisch unbestimmter Elemente statisch bestimmte verwendet werden. Dabei ist das Problem, die richtige Aufteilung für dieses System zu finden. Dazu soll ein Iterationsverfahren entwickelt werden.

Dem Singularitäten-Überlagerungsverfahren liegt der Gedanke zu Grunde, daß Spannungen verschiedenen Ursprungs durch Addition der Komponenten ermittelt werden können. Hierzu dient jeweils eine Grundlösung, z. B. bei Scheiben die bekannte Spannungsverteilung unter einer Einzellast in einer unendlichen Ebene wirkend. Mit dieser ist eine fiktive Lastverteilung in einer unendlichen Scheibe zu bestimmen, die den Randbedingungen einer zu untersuchenden Scheibe genügt. Dies kann z. B. mit Hilfe eines entsprechenden Gleichungssystems durchgeführt werden, wie z. B. in der Dissertation Dirlwanger [3]. Auch dieses Verfahren erfordert die Verwendung von Groß-Computern, wenn auch in vielen Fällen die Rechenzeit kürzer ist.

Hier läuft ein Forschungsvorhaben am Institut für Maschinenwesen, bei dem ein Iterationsverfahren entwickelt werden soll, bei dem zwar mehr Rechenoperationen als bei dem ursprünglichen Verfahren erforderlich sind, aber jede einzelne mit nur einer geringen Zahl von Unbekannten. Daher kommt dieses Verfahren mit Computern geringerer Kapazität aus.

Als erster Schritt in dieser Richtung wurde vom Verfasser bereits vor längerer Zeit ein rein zeichnerisches Verfahren entwickelt, das ganz ohne Computer arbeitet. Hierüber wird demnächst ein gesonderter Bericht veröffentlicht [4].

2. Zeichnerisches Verfahren zur iterativen Lösung nach dem Singularitäten-Überlagerungsverfahren

Dieses Verfahren beruht auf folgendem durch einen Gedankenversuch darstellbaren Prinzip:

Eine belastete Scheibe, in der die Spannungen ermittelt werden sollen, wird auf eine unendlich große Scheibe aufgezeichnet. In dieser werden dann Kräfte außerhalb des aufgezeichneten Randes angebracht, die zu Spannungen führen, die die Randbedingungen für die zu untersuchende Scheibe erfüllen. Wenn das erreicht ist, stimmen auch die Spannungen in der auf die unendliche Scheibe aufgezeichneten mit denen in der wirklichen Scheibe überein. Hierzu sind zunächst die Kräfte, die an der Scheibe angreifen, an der aufgezeichneten anzubringen. Diese erfüllen dann aber offensichtlich nicht die Randbedingungen für die tatsächliche Scheibe längs des aufgezeichneten Randes, z. B. die, daß am lastfreien Rand der Scheibe die Normal- und Schubspannungen verschwinden. Es ist dann ein System von fiktiven Zusatzkräften zu bestimmen und zwar so, daß die Spannungen aus den ursprünglichen - der Belastung der tatsächlichen Scheibe entsprechenden - Kräften und den fiktiven Zusatzkräften die Randbedingungen erfüllen. Diese sollen in diesem Verfahren iterativ ermittelt werden.

Als "Singularität" dient der Fall der Einzellast in der unendlichen Scheibe unter Vernachlässigung der Querdehnungszahl. Unter dieser Voraussetzung gilt für den Spannungszustand, daß es sich um einen einachsigen Spannungszustand mit Hauptspannungen, die Strahlen durch den Kraftangriffspunkt bzw. Kreisels darstellen,

Die zeichnerische Ermittlung der Spannungen läßt sich mit Hilfe des in Bild 1 verkleinert wiedergegebenen Diagramms durchführen. Dieses Strahlensystem stellt die eine Hälfte der Umgebung des Kraftangriffspunktes in einer unendlich großen Scheibe dar. Der Winkel zwischen je zwei benachbarten Strahlen ist so gewählt, daß die Summe der Spannungen σ_x (d. h. die in dem Sektor wirkende Kraft) gleich groß ist, x und zwar beträgt sie 1% der wirkenden Kraft. Zur Bestimmung der Spannungen zeichnet man den Rand der zu untersuchenden Scheibe auf Transparentpapier und legt dieses auf das Diagramm, und zwar so, daß in beiden Blättern die Kraftangriffspunkte und -richtungen zusammenfallen. Dann zeichnet man Vektoren von der Richtung der Strahlen des Diagramms mit Randpunkten als Angriffspunkten jeweils in der Mitte zwischen zwei Strahlen oder mit einem Strahl zusammenfallend. Diese Kraft-Vektoren sind als Spannungs-Vektoren aufzufassen, jeweils in dem Bereich zwischen den entsprechenden Strahlen gleichbleibende Spannungshöhe versinnbildlichend.

Nachdem man diese Vektoren aufgrund der an der Scheibe tatsächlich angreifenden Kräfte eingetragen hat, werden an den gleichen Stellen Kräfte von gleicher Größe aber entgegenge-

setzter Richtung angebracht, so daß in dem betreffenden Punkt die Summe der Kräfte gleich Null wird, wie es die Randbedingung erfordert. Da aber diese Kräfte am übrigen Rand auch wieder Spannungen verursachen, ist ihre Wirkung noch nicht ausreichend, um die Randbedingungen vollständig zu erfüllen. Man bringt daher an dem Rand wiederum Kräfte an, die den an den Punkten wirkenden Gleichgewicht bieten und wiederholt diesen Vorgang grundsätzlich so lang, bis in den einzelnen Punkten die Summe der weiter erforderlich werdenden Zusatzkräfte annähernd gleich Null wird.

Die Spannung in der eigentlichen Scheibe bestimmt man dann mit Hilfe des gleichen Diagramms auf ähnliche Weise an entsprechenden Schnitten.

3. Anwendungsbereich des zeichnerischen Verfahrens

Wie erwähnt, wird bei diesem Verfahren die Querdehnungszahl vernachlässigt. Damit ergibt sich die Frage, ob die damit gefundenen Lösungen auch mit der Wirklichkeit übereinstimmen.

Es ist bekannt, daß bei Scheiben der Einfluß der Querdehnungszahl entfällt, wenn es sich um einfach zusammenhängende Formen handelt, die nur am Rand belastet sind. Ferner ist dieser Einfluß gleich Null bei mehrfach zusammenhängenden, also Scheiben mit Löchern, wenn die Lochränder unbelastet sind oder die dort angreifenden Kräfte im Gleichgewicht sind oder nur ein resultierendes Moment ergeben.

Es wird dann gezeigt, wie man in Fällen, in denen diese Bedingung nicht erfüllt ist, doch noch zu einer brauchbaren Lösung kommen kann.

Dieses Verfahren kann ferner zur Lösung von Spezialproblemen, wie z. B. elasto-plastische Formänderungen, Wärmespannungen usw., herangezogen werden. Hierauf wird in späteren Veröffentlichungen eingegangen werden.

Literatur:

- | 1 | STEINCHEN, W.: Anwendung des Verfahrens der finiten Elemente auf ebene und räumliche Probleme. Diss. TU Clausthal 1973.
- | 2 | ZIMMER, A.: Digitales Verfahren für die wirtschaftliche Lösung von Festigkeitsproblemen und anderen Aufgaben der Elastizitätstheorie. Diss. TU Clausthal 1969.
- | 3 | DIRLEWANGER, H.: Beiträge zur Spannungsermittlung mit Singularitätenverfahren. Diss. TU Clausthal 1972.
- | 4 | KUSKE, A.: Zeichnerisches Verfahren zum Berechnen der Spannungen in Scheiben (erscheint in Kürze).

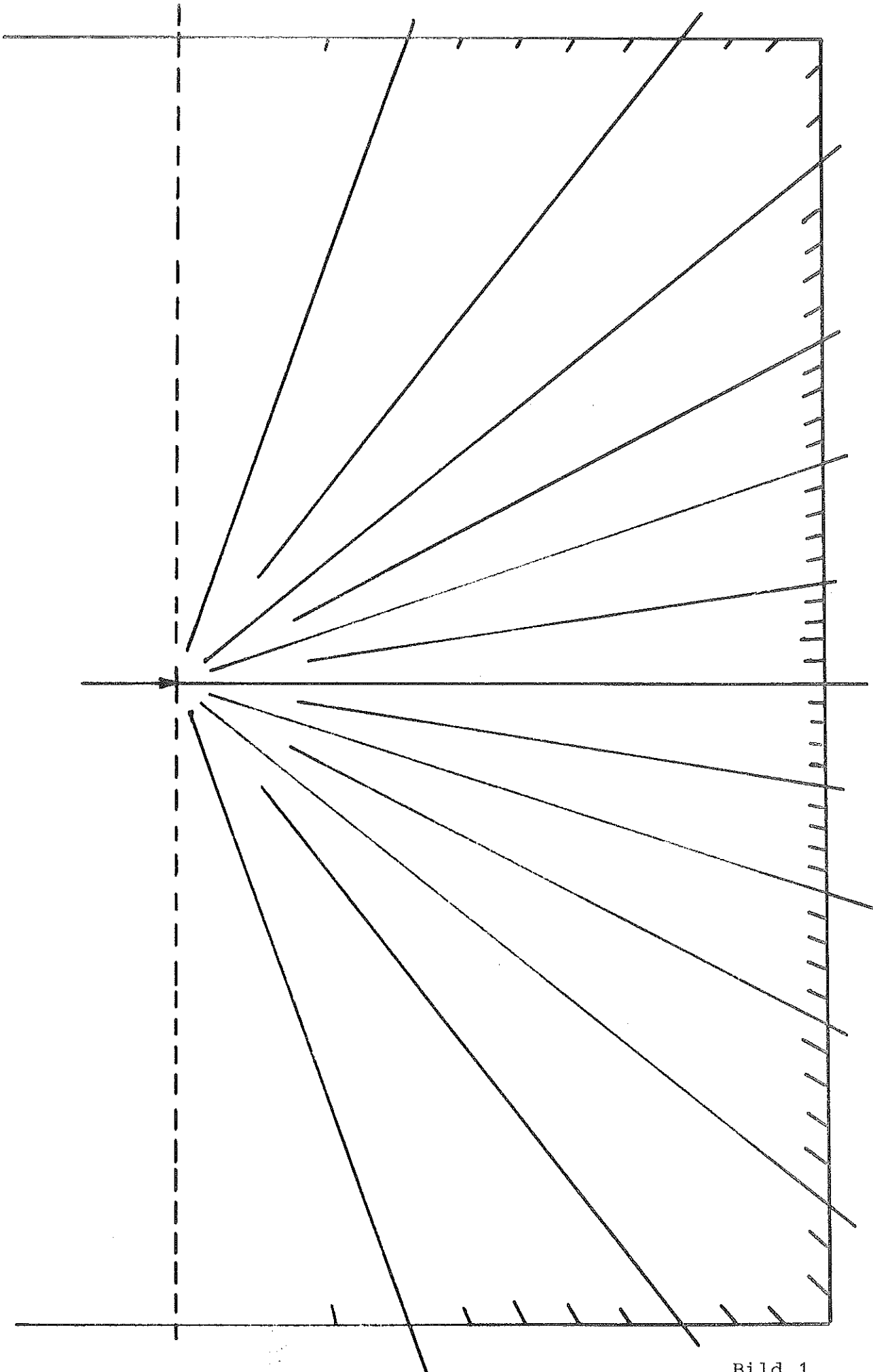


Bild 1

Spannungsoptische und rechnerische Untersuchung und Optimierung von Entlastungskerb

Dr.-Ing. W. Steinchen

Aus konstruktiven Gründen ist für das Bauteil mit kreisförmigem Querschnitt eine Umlaufnut notwendig (Bild 1). Diese Querschnittsänderung wirkt als Kerbe und verursacht Spannungskonzentrationen. Jedoch besteht die Möglichkeit, diese Spannungserhöhungen im Bereich der Kerbe zu vermindern, ohne ihre grundsätzliche Form oder die Beanspruchungsart zu verändern. Die Spannungskonzentrationen lassen sich mit Entlastungskerb verringern. Bringt man nämlich im Störbereich einer Kerbe weitere Kerben an, so beeinflussen die jeweiligen Störbereiche einander derart, daß die Spannungskonzentrationen der Einzelkerbe mit der Wahl optimaler geometrischer Abmessungen der Kerben infolge der Entlastungswirkung herabgesetzt wird. Im letzteren Fall kann mit schrittweisem Ändern der Geometrie der Entlastungskerbe und mit Hilfe des Vergleichs der Spannungsmaxima in Haupt- und Entlastungskerbe das Spannungsmaximum der Entlastungskerbe (EK) gefunden werden, wenn das der Hauptkerbe (HK) gerade übertroffen wird. Damit ist eine Optimierung der Kerben möglich, indem - wie später gezeigt wird - die ermittelten Werte in einem Diagramm aufgetragen werden und der Punkt gleicher Spannungsmaxima in Haupt- und Entlastungskerbe bestimmt wird [1, 2, 3].

Für die Einflußgrößen Form, Lage und relative Abmessungen der Entlastungskerbe bezüglich der Hauptkerbe besteht die Möglichkeit, in Reihenuntersuchungen jeweils nur einen der Parameter zu variieren und zu optimieren. Z. B. wurden an einem beidseitig gekerbten Zugstab seitlich der Hauptkerbe in einem Abstand von 3ρ Entlastungskerb angebracht (Bild 2a). Bei konstanter Form der Haupt- (HK) und Entlastungskerbe (EK) wurde die Tiefe t' der Entlastungskerbe variiert. Mit zunehmendem Verhältnis t'/t fällt die Formzahl und damit Spannungskonzentration bei Zug an der Hauptkerbe (HK_z) und steigt an der Entlastungskerbe (EK_z). Der Schnittpunkt der Kurvenverläufe (Bild 2 b) $t'/t=0,9$ für die Verhältnismerte $b/d=1,5$ $\rho/d=0,125$ ergibt die optimale Formzahl $\alpha_{K_z}=2,12$ bei Zug. Das bedeutet im Vergleich zum gekerbten Stab ohne Entlastungskerb mit einer Formzahl $\alpha_{K_z}=2,58$ eine Verminderung um 18%. Wird die Kerbtiefe $t'=t$, so verringert sich die Spannungskonzentration an der Hauptkerbe zwar weiter, die der Entlastungskerbe hingegen nimmt zu. Bei $t'=t$ läßt sich diese Spannungserhöhung für die Entlastungskerb - und geringfügiger für die Hauptkerbe - verringern, wenn die Entlastungskerb abgewinkelt werden. Das führt für den Abschrägungswinkel $\alpha=79^\circ$ zu einem weiteren optimalen Wert für die Formzahl $\alpha_{K_z}=1,84$, also zu einer gesamten Verminderung der Formzahl von etwa 29%.

Auf Bild 2 b sind neben den Verläufen HK_z und EK_z für die Formzahl der Haupt- und Entlastungskerbe bei Zugbeanspruchung des Stabs die bei Biegung HK_B und EK_B dargestellt. Für $t'/t=0,97$ stellt sich für den Schnittpunkt von HK_B und EK_B in diesem Fall ein optimaler Wert für die Formzahl $\alpha_{K_B}=1,79$ ein, also eine Verminderung um 9% im Vergleich zum Bauteil lediglich mit Außenkerbe. Werden die Entlastungskerb bei $t'/t=1,0$ abgewin-

kelt, kann ein zweiter optimaler Wert für $\alpha_{KB} = 1,75$ gefunden werden. Die Gesamtverminderung um 11% ist also für die vergleichbaren geometrischen Abmessungen geringer als bei Zugbeanspruchung. Bei weiteren Untersuchungen für das Verhältnis von Kerbradius ρ zu Breite d des Restquerschnittes der Hauptkerbe für die Werte 0,1; 0,15; 0,2; 0,25 zeigt sich ein Abfall der Formzahl α_K für Zug- und Biegebeanspruchung bei geringfügiger Zunahme des Kerbtiefenverhältnisses t'/t , so daß die gefundenen optimalen Werte mit einer Kurve verbunden werden können. Analog ergeben sich die Linien für die Optimalwerte bei Zug und Biegung beim Abwinkeln der Entlastungskerbten [4].

Die für Wellen mit Umlaufnuten sowohl bei Zug- als auch bei Biegebeanspruchung in Betracht kommenden Entlastungskerbten lassen sich an einfachen, ebenen Bauteilen optimieren und ihre Abmessungen auf räumliche Ausführungen übertragen, wobei die Verminderung der Spannungskonzentration an diesen bestimmt wird.

Bei der Beurteilung von Entlastungskerbten für den Vergleich ihrer verschiedenen Wirkung läßt sich beziehen auf die prozentuale Verminderung der Spannungskonzentration $V (\sigma_K)$ als Differenz zwischen der ohne und mit Entlastungskerbten. Die Übertragbarkeit der an ebenen Ersatzstrukturen gewonnenen optimalen Abmessungen der Entlastungskerbten auf räumliche Bauteile, die zu einer Spannungsverminderung im Bauteil führen, zeigt Bild 3. Die Verminderung der Spannungskonzentration $V (\sigma_K)$ bei Biegung liegt bei $\rho/d=0,125$, $b/d=1,5$ und $t'/t=0,9$ im Vergleich zu dem auf Bild 4 gezeigten, auf Zug beanspruchten Stab mit denselben Abmessungsverhältnissen der Kerbe bedeutend niedriger.

Numerisch erzielte und spannungsoptisch gewonnene Ergebnisse für die Untersuchungen von Kerben und deren Spannungsverminderung mit Entlastungskerbten stimmen gut überein.

Diese Untersuchungen werden z. Zt. an Wellen mit Querschnittsübergängen oder Schultern, die auf Biegung und Torsion beansprucht werden, fortgeführt. Die auf Biegung beanspruchten Wellen werden auf spannungsoptischem Weg untersucht, indem, wie in Bild 3 gezeigt, die bereits bezeichneten Parameter wie ψ , ρ , t und t' der Haupt- und Entlastungskerbten variiert werden [5].

Für die Untersuchung von tordierten Wellen wird die Differentialgleichung

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r^3} \frac{\partial S_T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{r^3} \frac{\partial S_T}{\partial z} \right) = \frac{\partial^2 S_T}{\partial r^2} - \frac{3}{r} \frac{\partial S_T}{\partial r} + \frac{\partial^2 S_T}{\partial z^2} = 0$$

diskretisiert und mit der Differenzenrechnung die Torsionsspannungsfunktion S_T und damit die Schubspannungen berechnet. Aus der Spannungskonzentration am Querschnittsübergang lassen sich die Formzahl bestimmen und an günstigen Stellen Kerben zur Entlastungswirkung anbringen [6].

Literatur:

- | 1 | JUDT, H.O.: Verminderung der Spannungskonzentration in Kerben durch Entlastungskerben. Mitteilungen 1/72 S.6 Institut für Maschinenwesen, TU Clausthal.
- | 2 | KUSKE, A.: ROBERTSON, G.: Photoelastic Stress Analysis. John Wiley & Sons, London 1974.
- | 3 | JUDT, H. O.: Spannungsoptische Untersuchung und Optimierung von Entlastungskerben. Diss. TU Clausthal 1973.
- | 4 | STEINCHEN, W.: Rechnerunterstütztes Entwerfen. KONSTRUKTION, H. 11, 1974.
- | 5 | BERTZKY, R.: Spannungsoptische Untersuchung und Optimierung von Entlastungskerben von gekerbten und auf Biegung beanspruchten Wellen. Diplomarbeit TU Clausthal.i.V.
- | 6 | VDEh-Abschlußbericht über Entlastungskerben an gekerbten Flachstäben und Wellen. i.V.



Bild 1: Gekerbtes, auf Zug beanspruchtes Bauteil, dessen Spannungskonzentration an der Hauptkerbe mit Hilfe von Entlastungskerben vermindert werden soll

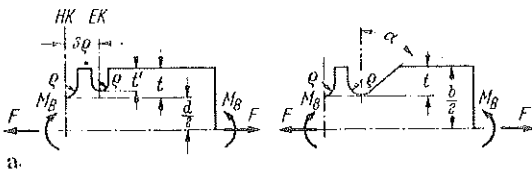


Bild 2: Abhängigkeit der Formzahl α_K von der Kerbtiefe bzw. Abwinkelung bei einem beidseitig gekerbten, auf Zug (Z) und Biegung (B) beanspruchten Stab mit Entlastungskerben (Kerbradius und Abstand 3ρ konstant); a) beidseitig gekerbter Zugstab mit Entlastungskerben (ρ Kerbradius, HK Hauptkerbe mit Kerbtiefe t , EK Entlastungskerbe mit Kerbtiefe t' , b Breite des Stabs (konst.), d Breite des Restquerschnitts der HK, α Winkel für die Abschragung der EK, F Zugkraft, M_B Biegemoment; b) Verläufe der Zugbeanspruchung HK_Z und EK_Z sowie der Biegebeanspruchung HK_B und EK_B

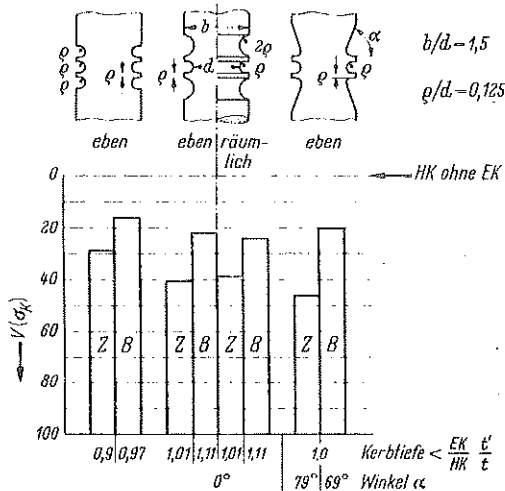
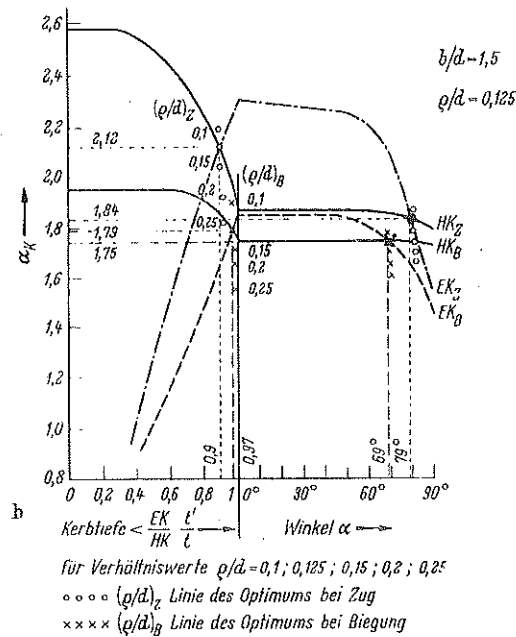


Bild 3: Spannungsverminderung $V(\alpha_K)$ an ebenen Bauteilen und Vergleich der an Wellen mit Umlaufnuten gewonnenen Ergebnisse (Bild Mitte) infolge von Entlastungskerben bei Zug (Z) und Biegung (B) (Abmessungen bzw. Bezeichnungen vgl. Bild 2)

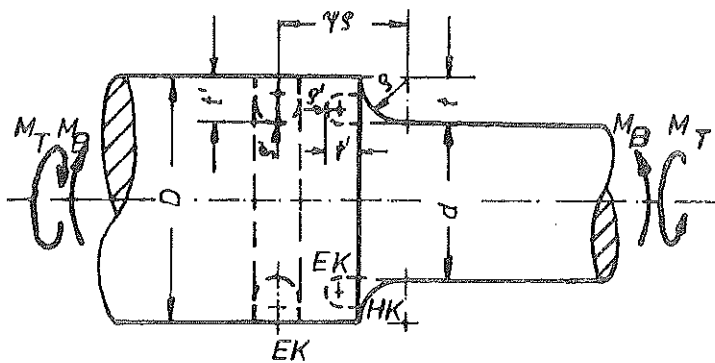


Bild 4: Auf Biegung bzw. Torsion beanspruchte Welle mit Querschnittsübergang und mögliche Stellen für Entlastungskerben

Spannungsoptische Ermittlung von Eigenspannungen in geschweißten Konstruktionen

Dipl.-Ing. B. Jain

1. Problemstellung

In geschweißten Konstruktionen werden durch die äußere Belastung Spannungen erzeugt, denen Schweißbeigenspannungen überlagert sind.

Die äußere Last kann je nach der Betriebsbeanspruchungsart ruhend, schwellend oder auch wechselnd sein, wogegen die Eigenspannungen stets als ruhende Vorspannung anzusehen sind. Bei wechselnder Betriebsbeanspruchung führt also eine Eigenspannung zu einer Verschiebung des Spannungsmittelwertes σ und damit unter Umständen zu einer erheblichen Verminderung^m der Dauerbelastbarkeit einer Konstruktion.

Die Größe und Art dieser Eigenspannungen ist abhängig von der Form des Bauteils einerseits und von dem jeweiligen Schweißverfahren andererseits. Durch eine gezielte Wärmebehandlung des geschweißten Bauteils ist eine Verminderung bzw. Beseitigung der Eigenspannungen grundsätzlich möglich. Aber eine solche Behandlung ist oft technisch nicht durchführbar oder wird aus wirtschaftlichen Gründen unterlassen.

Die Ermittlung der tatsächlich auftretenden Bruchgefahr unter der Betriebslast in Schweißkonstruktionen ist nicht möglich, wenn die Eigenspannungen nach ihrer Art und Größe nicht als bekannt vorausgesetzt und in der Berechnung berücksichtigt werden können.

Experimentelle Untersuchungen, wie z. B. mit Hilfe von Dehnungsmessungen oder empirische Festigkeitsermittlung z. B. mit Dauerprüfmaschinen sind insofern problematisch, als hier der Einfluß der Eigenspannungen ebenfalls nicht erfaßt werden kann. Die Ermittlung der Eigenspannungen an der Hauptausführung ist grundsätzlich stets mit erheblichen Schwierigkeiten verbunden. Die Verwendung der Dehnungsmeßstreifen ist wegen der hohen Schweißtemperatur im Nahtbereich nicht möglich. Zerstörende Eigenspannungsmeßverfahren, bei denen durch einen Eingriff in das Eigenspannungsfeld Eigenspannungen ausgelöst und die Rückfederung durch Dehnungsmeßeinrichtungen bestimmt werden, haben unter anderem den Nachteil, daß der Probekörper durch Sägeschnitte, Bohrlöcher usw. mindestens teilweise zerstört wird |1|. Auch die zerstörungsfreie Methode z. B. mittels Röntgenfeinstrukturmessungen erfordern einen erheblichen Aufwand und erfassen nur eine sehr dünne Oberflächenschicht.

Mit Hilfe spannungsoptischer Verfahren ist es aber möglich, die Schweißbeigenspannungen sichtbar zu machen und nach ihrer Art und Größe zu erfassen. Außerdem veranschaulichen spannungsoptische Bilder die Zusammenhänge und lassen das Wesentliche, z. B. die Unterschiede bei konstruktiven Änderungen deutlich und einfach entnehmen. Die Dissertation des Verfassers soll die An-

wendbarkeit der gewählten Verfahren zeigen und bestimmte technische Probleme verschiedener Art untersuchen.

2. Untersuchungsverfahren und -werkstoff

Als Untersuchungsverfahren wurden zwei Vorschläge von Kuske in Betracht gezogen. Bei dem ersten Verfahren wird der Eigenspannungszustand zunächst in einem Probestück - näherungsweise - in Stufen realisiert, indem Stücke elastischen Modellwerkstoffs unter entsprechender Verspannung zusammengeklebt werden. Während in der Hauptausführung der Übergang der Spannungszustände stufenlos ist, kann die Stufung im Modell natürlich nur eine mehr oder weniger brauchbare Näherung ergeben.

Bei dem zweiten Vorschlag wird ein schmelzbarer Modellwerkstoff verwendet, mit dem der Schweißvorgang ähnlich der Hauptausführung durchgeführt werden kann. Hierfür eignet sich Polykarbonat (bekannt unter dem Handelsnamen Makrolon der Firma Bayer-Leverkusen). Wegen seiner sowohl photoelastischen als auch photoplastischen Eigenschaften ermöglicht Polykarbonat die Erfassung des gesamten Schweißvorgangs [2]. Mit Probestücken aus diesem Modellwerkstoff werden aus der Literatur bekannte Spannungsmessungen und -berechnungen an Schweißkonstruktionen aus Stahl (1, 3 und 4) verglichen. Dabei zeigte sich eine weitgehende Übereinstimmung zwischen den Ergebnissen der Modellversuche und denen der Hauptausführung.

Literatur:

- | 1 | BUSSCHE, G.v.d.: Untersuchungen über die Größe und Verteilung von Eigenspannungen und Formabweichungen beim Schweißen. Diss. TU Hannover 1968.
- | 2 | KUSKE, A. und ROBERTSON, G.: Photoelastic Stress Analysis. John Wiley and Sons, London 1974.
- | 3 | BIERETT, G.: Versuche zur Ermittlung der Schrumpfspannungen in geschweißten Stumpfnahverbindungen. ZVDI 78 (1934), H. 23, S. 709/715.
- | 4 | TALL, L.: Residual Stresses in Welded Plates - A Theoretical Study, Weld. J. 43 (1964) S. 10s/23s.

Spannungsoptische Modelluntersuchungen von Metall-
Umformvorgängen

Dipl.-Ing. J. ...

1. Aufgabenstellung

Die Umformvorgänge von Metallen, wie z. B. Schmieden, Pressen, Walzen, Strangpressen usw. stellen sowohl an das Umformgut als auch an die dabei verwendeten Werkzeuge teilweise erhebliche Anforderungen. Daraus ergeben sich bestimmte quantitative oder qualitative Notwendigkeiten für die Durchführung des Arbeitsgangs.

Untersuchungen über diese Probleme wurden schon seit längerer Zeit experimentell durchgeführt |1|, da Rechnungen, die auf Überlegungen beruhen, sehr aufwendig sind und nicht mit Sicherheit mit der Wirklichkeit übereinstimmen. Für experimentelle Untersuchungen wurden bisher Messungen an der Hauptausführung bzw. an dem gleichen Material durchgeführt oder aber an Modellwerkstoffen. Bei diesen Untersuchungen konnten meist nur die Bewegungen im Umformgut mit Hilfe entsprechender Markierungen ermittelt werden. Dagegen waren die Spannungen im Umformgut selbst und an den Werkzeugen kaum zu ermitteln. In letzter Zeit hat man auch wieder versucht, unter Verwendung von Groß-Computern die Rechnungen zu verfeinern |2|.

Nach einem Vorschlag von Kuske wurden bereits früher an der TH Stuttgart und jetzt in verstärktem Maß an dem Institut für Maschinenwesen der TU Clausthal spannungsoptische Untersuchungen durchgeführt. Dabei wird ein plastischer Modellwerkstoff verwendet, der unter mechanischer Beanspruchung spannungsdoppelbrechend wird |3|. Als solcher kann z. B. warmhärtendes Epoxidharz (Lekutherm X 30 der Firma Bayer, Leverkusen) ohne Härter oder mit geringem Härterzusatz verwendet werden.

2. Übertragbarkeit der Ergebnisse

Eine vollständige Übereinstimmung zwischen Modell und Hauptausführung kann natürlich nur gegeben sein, wenn das mechanische Verhalten des Modellwerkstoffs dem des Werkstoffs der Hauptausführung ähnlich ist.

Zum Vergleich der drei plastizitätstheoretischen Grundgleichungen für plastostatische Ähnlichkeit

a) $\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_i} = 0$ (Gleichgewichtsbedingung)

b) $S'_{ij} S'_{ij} = \frac{2}{3} k_f^2$ (Fließbedingung)
 S' = Spannungsdeviator,
 k_f = Formänderungsfestigkeit

c) $\dot{\epsilon}_{ij} = \dot{\lambda} \cdot S'_{ij}$ (Spannungs-Verzerrungs-Beziehung)

müssen folgende Modellmaßstäbe eingeführt und erfüllt werden:

$$x_i = \alpha \cdot \bar{x}_i \quad (\text{Längen})$$

$$F_i = \beta \cdot \bar{F}_i \quad (\text{Kräfte})$$

$$t = \tau \cdot \bar{t} \quad (\text{Zeit})$$

Wichtig ist aber auch, daß die optischen Eigenschaften des Werkstoffs eindeutige Schlüsse auf die Spannungen in dem Umformgut zulassen.

3. Eichung des Modellwerkstoffs

Warmhärtendes Epoxiharz ohne Härterzusatz wurde bereits von H. Szeibert in seiner Diplomarbeit an der Technischen Hochschule Stuttgart, 1962 (bei Prof. Kuske) eingehend untersucht. Es zeigte sich damals bereits, daß der Werkstoff für solche Untersuchungen durchaus geeignet erschien. Diese Untersuchungen wurden inzwischen wiederholt und erweitert. Dabei stellte sich heraus, daß zwischen Spannungen und optischem Effekt eine lineare Abhängigkeit besteht, wobei die Temperatur als Parameter eingeht. Dabei spielen die kurzen Relaxationszeiten des Modellwerkstoffs keine Rolle [4].

4. Anwendungsbereich der Untersuchungen

Es soll der Inhalt der Dissertation des Verfassers sein, verschiedene Arten von Umformvorgängen einerseits mit den Ergebnissen anderer Untersuchungen zu vergleichen und andererseits Untersuchungen durchzuführen, die mit anderen Verfahren nur schwer realisierbar wären. Es werden aus den Untersuchungen wichtige Erkenntnisse für die Praxis der verschiedenen technischen Verfahren erwartet.

Da bei den Untersuchungen auch die Werkzeuge aus spannungsoptisch wirksamen Werkstoff hergestellt werden können, ist es möglich, bei diesen Untersuchungen die Spannungen nicht nur im Umformgut, sondern auch in den Werkzeugen zu ermitteln. (Für das Strangpressen von Aluminium wurden mit Hilfe spannungsoptischer Untersuchungen bereits wichtige technische Entwicklungen, die zu mehreren Patenten geführt haben, am Institut für Maschinenwesen gemacht).

Literatur:

- [1] UNKEL, H.: Über die Fließbewegung. Springer 1928.
- [2] ADLER, G.; DALHEIMER, R.: Ein numerisches Verfahren zur Behandlung von Problemen der Umformtechnik. WERKSTATTSTECHNIK 1972 S. 194
- [3] KUSKE, A.: Taschenbuch der Spannungsoptik. Wiss. Verlagsanstalt, Stuttgart 1971.
- [4] THIEME, H.: Dipl.-Arbeit am Inst. f. Maschinenwesen, TU Clausthal, 1974



