

## Zur Problematik der Festigkeitsvorhersage von Bauteilen

Von **W. Kloth**, Braunschweig-Völkenrode

Der Praktiker denkt bei der Entwicklung oder Erprobung einer Maschine zunächst weniger an die mechanische Festigkeit der Bauteile als an deren komplexe Haltbarkeit. Er bezieht darunter auch die Festigkeit gegen Verschleiß, gegen Korrosion usw. mit ein. Hier soll aber nur die erstere, nämlich die Verformungs- und die Bruchfestigkeit behandelt werden. Man unterscheidet elastische und plastische Verformung und Instabilitäten; von Brüchen unterscheidet man Gewalt-, Dauer- und Sprödbüche. Das ganze Festigkeitsverhalten wird von den mechanischen Spannungen bestimmt, die in den Werkstoffen herrschen. Die Gesamtheit der mechanischen Spannungen an der Oberfläche eines Werkstückes nennt man das Spannungsfeld. Die Spannungen sind nach Art, Größe, Richtung, Mehrachsichtigkeit, Gradient usw. verschieden. Für jede Art der Widerstandsfähigkeit gibt es ein optimales Spannungsfeld. Wegen dieser vielen Varianten kann man in der Tat von einer Problematik der Festigkeitsvorhersage sprechen. Wir werden sehen, daß noch weitere Einflußfaktoren hinzukommen.

Es sei gleich hier vermerkt, daß unter diesen Umständen eine treffsichere und verbindliche Berechnung der Festigkeit nicht oder doch nur unter sehr vereinfachten Annahmen möglich ist. Man kann aber immer ein „besser als“ angeben, was in der Praxis auch schon weiterhilft.

### Die Spannungsfelder [1]

Nur in einem zylindrischen Zugstab sind die Spannungen gleichmäßig verteilt und in einem gleichförmigen Biegestab nach den Biegungsgesetzen. Sobald aber eine Ungleichförmigkeit im Querschnitt vorliegt, gibt es auch eine Ungleichförmigkeit in den Spannungen. Dabei werden die Spannungen um so höher, je schroffer die Ungleichförmigkeit ist. Bekannt sind solche Erhöhungen durch Kerben, aber sie sind keineswegs darauf beschränkt, sondern treten überall auf, wo die erwähnten Ungleichförmigkeiten im Querschnitt sind, seien es nun Verdickungen oder Verdünnungen oder gar Aussparungen. Oft können an sich belanglose Anschweißungen, Lappen oder Laschen, auch Poren, Schweißnähte und dergleichen mehr die Ursache von Spannungserhöhungen sein.

Im ganzen genommen sind die Spannungsfelder in technischen Bauteilen recht ungleichmäßig, und die Frage ist durchaus berechtigt, welche günstigste Gestalt die Bauteile für einen bestimmten Zweck haben sollen.

### Die günstigsten Spannungsfelder

Am günstigsten sind immer gleichmäßige Spannungsfelder. Wenn alle Werkstoffteilchen eine gleichmäßig hohe Spannung haben, dann ist der Werkstoff am besten ausgenutzt. Leider ist das aber praktisch nie der Fall, sondern es sind immer nur begrenzte, unter Umständen sehr kleine Bereiche mit besonderer Spannung für die Festigkeit der Bauteile entscheidend. Man kann heute noch nicht in jedem Fall exakt angeben, was für ein Spannungsfeld man verlangen soll, aber man kann sich doch mancherlei Gedanken darüber machen.

Die elastische Verformung eines Bauteiles ist um so kleiner, je mehr seiner Werkstoffteilchen zur Übernahme von Spannungen herangezogen werden. Dabei muß man bedenken,

an welcher Stelle die elastische Nachgiebigkeit des Bauteiles interessiert. Sie braucht durchaus nicht die Stelle der Verformung des Werkstoffes zu sein, sondern kann am Ende eines langen Hebelarmes, der die Bewegung u. U. vergrößert, liegen. Die elastische Verformung der Konstruktionen soll mitunter groß sein, z. B. bei Fahrzeugen und Landmaschinen. Dann ist gleichzeitig zu fordern, daß keine Spannungsspitzen auftreten, weil durch sie Dauerbrüche verursacht werden können.

Die plastische Verformung hat mit Schubspannungen zu tun. Wenn man die plastische Verformung vermeiden will, muß man auf die Schubspannungen achten.

Bei zunehmender Verformung beginnt der Werkstoff in feinen Linien (*Lüderslinien*) zu fließen, die sich allmählich verbreitern und schließlich verästeln. Das Fließen beginnt an der Oberfläche, dringt aber schließlich unter  $45^\circ$  in den Querschnitt ein. Es sind also dicht nebeneinander elastisch und plastisch verformte Gebiete. Die Vorschrift, daß die Bauteile nicht über die Streckgrenze beansprucht werden sollen, ist also bei Vorhandensein von Schubspannungen besonders zu beachten.

Bei Instabilitäten (Knicken, Beulen) wird man ebenfalls auf eine gleichmäßige Spannungsverteilung achten. Bei zunehmender Last ändern sich aber die Hebelarme, und die Verformung nimmt schnell zu, bis sie schließlich aufhört oder sich in plastische Verformungen auflöst. Auch hier sind schließlich Schubspannungskonzentrationen für die Festigkeit der Bauteile maßgebend.

Gewaltbrüche werden durch mehr oder weniger große Verformungen eingeleitet. Hohe Spannungen sind die Ursache; aber wenn sie nur in kleinen Bereichen herrschen, fließt dort der Werkstoff, und die Spannungen gleichen sich aus. Die Bruchgefahr wird dadurch hinausgeschoben. Durch das Fließen werden Lockerstellen im Gefüge beseitigt, wodurch eine Verfestigung und eine Erhöhung der Widerstandsfähigkeit eintritt. Es muß also schon in größeren Bereichen des Bauteils eine hohe Spannung herrschen, wenn ein Gewaltbruch eintreten soll.

Von Bedeutung ist hinsichtlich der Festigkeit der Bauteile noch die Belastungsgeschwindigkeit. Während Normalspannungen sehr schnell darauf reagieren, brauchen Schubspannungen eine gewisse Zeit bis sie sich darauf einstellen. Das Wandern der Versetzungen dauert eine gewisse Zeit, deshalb ist die Festigkeit bei Stößen größer als bei langsamer Belastung. Dabei ist allerdings vorausgesetzt, daß ein gewisser plastischer Abbau der Spannungen eintreten kann, da sonst spröde Brüche eintreten können.

### Sprödbüche

Hierüber hat man sich viel Gedanken gemacht, da sie sehr überraschend und ohne vorherige Ankündigung durch Verformungen eintreten. Sie werden durch mehrachsige Zugspannungen (weil dann nach den Mohrschen Kreisen keine oder nur kleine Verformungen durch Schubspannungen eintreten können), durch niedrige Temperatur und stoßartige Belastung begünstigt. Ungünstig ist von seiten der Werkstoffeigenschaften, wenn der Steilabfall der Kerbschlagfestigkeit schon bei hoher, anstatt erst bei niedriger Temperatur eintritt. Von den Spannungen können sich hohe Eigenspannungen ungünstig auswirken [2].

### Die Eigenspannungen

Es wurde ausgeführt, daß die Festigkeit der Bauteile von den Spannungen abhängt, die in deren Werkstoff herrschen, und zwar je nach den Beanspruchungen, denen die Bauteile unter-

*Prof. Dr.-Ing. Dr. agr. h. c. Willi Kloth, Direktor i. R. des Institutes für landtechnische Grundlagenforschung der Forschungsanstalt für Landwirtschaft, Braunschweig-Völkenrode, ist Leiter der Forschungsgruppe für Spannung und Konstruktion an diesem Institut.*

worfen sind und je nach den Spannungen, welche die Werkstoffe ertragen können. Diese „zulässigen“ Spannungen haben nicht sehr viel mit den in den Normen festgelegten Größen zu tun, denn diese sind an zylindrischen, gleichmäßig und langsam beanspruchten Zugstäben ermittelt, während die Beanspruchung in den Bauteilen meist ganz anders ist.

Es kommt aber noch etwas anderes hinzu, daß nämlich vor dem Auftreten der durch äußere Lasten entstehenden Spannungsfelder meist schon ein anderes Spannungsfeld in den Bauteilen vorhanden ist, das Feld der Eigenspannungen, das von der Herstellung, der Warm- oder Kaltbearbeitung, dem Schweißen usw. herrührt und ganz anderen Gesetzen gehorcht. Beide Spannungsfelder überlagern sich und ergeben erst gemeinsam das resultierende Spannungsfeld, das für das Festigkeitsverhalten maßgebend ist.

Beide Spannungsfelder sind im allgemeinen dreiachsig, und da man nur an der Oberfläche, also nur zweiachsig messen kann<sup>1)</sup>, läßt sich nicht mit Sicherheit angeben, ob nicht gewisse Komponenten schon die Fließgrenze überschreiten. Die Eigenspannungen liegen oft in der Größenordnung der Lastspannungen, so daß sie keineswegs belanglos sind und es höchste Zeit wird, daß man über sie Näheres erfährt. Eine besondere Bedeutung wird den Eigenspannungen — wie erwähnt — für die Beurteilung der Sprödbuchgefahr zugemessen [2].

### Der Dauerbruch

Während die elastische und plastische Verformung von den Werkstoffeigenschaften, insbesondere von dem Elastizitätsmodul, der Streckgrenze und natürlich von der Größe der Spannungen abhängt, der Gewaltbruch von der Größe der Spannung in größeren Bereichen im Verhältnis zur Festigkeit des Werkstoffes und der Sprödbuch von hohen dreiachsigen Zugspannungszuständen, ist das beim Dauerbruch ganz anders. Beim Gewaltbruch können sich hohe Spannungen in kleinen Bereichen durch Fließen ausgleichen, aber beim Dauerbruch genügt es, wenn der Werkstoff schon in ganz kleinen Bereichen durch Ermüdung bei immer wiederkehrender Belastung einreißt und sich der Bruch dann über den ganzen Querschnitt fortsetzt. Man kann hiergegen nicht sehr viel durch höhere Werkstofffestigkeit tun, sondern nur dadurch, daß man Spannungsspitzen — selbst in kleinsten Bereichen — vermeidet, dazu muß man die Gesetze der Spannungsfelder kennen und sie beherrschen. Das ist vielen Konstrukteuren noch nicht ganz geläufig, denn es sind nicht nur grobe, schroffe Unebenheiten der Querschnitte, die beachtet werden müssen, sondern auch Schweißnähte, Poren usw. [3].

Eine Festigkeitsrechnung für die Dauerfestigkeit ist recht fragwürdig, aber man erreicht schon viel, wenn man die erwähnten Spannungsspitzen vermeidet. Wie das zu geschehen hat, kann z. B. dem „Atlas der Spannungsfelder in technischen Bauteilen“ [1] nach entsprechender Einarbeitung entnommen werden.

### Der Einsatz in der Praxis

Der Wissenschaftler muß versuchen, die Einflüsse auf die Festigkeit zu zergliedern, um die einzelnen Ursachen zu erkennen. Das ist im Vorhergehenden geschehen. Er muß aber auch versuchen, den ganzen Komplex der Vorgänge in den ausgeführten Konstruktionen während des Betriebes zu übersehen, denn sie sind ja entscheidend. Hier zeigt sich nun eine Fülle verschiedenartiger Geschehnisse. Es wirken im allgemeinen Kräfte und Drehmomente von ganz verschiedener Größe und Richtung, stoßartig und mit verschiedener Frequenz. Von den vorstehend beschriebenen Eigenschaften werden ganz verschiedene in Anspruch genommen. Ob eine davon das zulässige Maß übersteigt, kann sich nur im praktischen Betrieb zeigen.

Ein Grenzfall ist die gleichmäßige ruhige Belastung, wie sie z. B. im Hochbau vorliegt. Hier ändert sich die Beanspruchung gar nicht oder nur sehr wenig, da der Schwankungsgrad der

Last sehr gering ist. Die Ausnutzung des Werkstoffes kann sehr hoch getrieben werden. Auch bei Brücken ist das der Fall. Arbeitsmaschinen mit gleichmäßiger Last oder Kraftmaschinen schließen sich an. Je ungleichmäßiger die Last, also je größer der Schwankungsgrad wird, um so mehr Werkstoff muß man vorsorglich vorsehen. Ein Extrem sind Maschinen, die stoßartig und in verschiedener Richtung beansprucht sind, z. B. Fahrzeuge, die über schlechte Fahrbahnen fahren. Hier muß man im regelmäßigen Betrieb oft mit über dem 3fachen, bei Stößen mit über dem 10fachen der „normalen“ Last und in nicht übersehbarer Richtung rechnen. Vom Standpunkt der Ausnutzung des Werkstoffes ist das unerwünscht, aber der Praktiker schätzt den Begriff der „Lebensdauer“ und läßt sich diese Eigenschaft etwas kosten. Viele Maschinen werden überhaupt nicht von der eigentlichen Arbeit entscheidend beansprucht. Bei Mähmaschinen wurde z. B. gefunden [4; 5], daß sie völlig „schwingungsverweicht“ von den schnell hin und her schwingenden Messern sind. Das eigentliche Schneiden beansprucht nur wenig Kraft. Die Ingenieure wären sicher in der Lage, wesentlich leichtere und billigere Maschinen zu bauen, wenn der jetzige Zustand nicht bequemer und die „Lebensdauer“ nicht wäre. Bei Schleppern wird die Lage nicht viel anders sein. Hier ist die Kopplung mit dem für die Zugkraft nötigen Adhäsionsgewicht noch unangenehm, die in weitem Maße fortfallen würde, wenn die Schlepper nicht noch immer aus historischen Gründen so viel ziehen müßten.

Rechnet man die in vielen Fällen recht schlechte konstruktive Ausnutzung des Werkstoffes hinzu, so ergibt sich eine Ausnutzung der Festigkeit, die recht kümmerlich ist. Man kann trotzdem die Maschinen nicht beliebig leichter bauen, da sie sonst nicht halten würden. Das kommt daher, daß in der Regel nur kleine Werkstoffbereiche für die Festigkeit entscheidend sind und daß der „normale“ Konstrukteur die Zusammenhänge bei der Gestaltung der Bauteile und auch die der Kräfte noch viel zu wenig kennt, um optimal arbeiten zu können.

### Der forcierte Einsatz

Die Praktiker, d. h. die Versuchstechniker der Firmen, möchten möglichst schnell wissen, wie eine neuentwickelte Maschine ein Leben von einem oder gar mehreren Jahrzehnten überstehen wird. Eine Antwort erhoffen sie sich von einem forcierten Einsatz, bei dem die Kräfte eine kurze Zeit hindurch möglichst hochgetrieben werden. Wie weit dies gesteigert wird, ist in der Regel der subjektiven Beobachtung überlassen. Es ist klar, daß eine Maschine nicht jeder Art und Größe von Kräften gewachsen sein kann. Dann wird sie viel zu teuer werden. Die Schadensstatistik gibt hier einige Anhaltspunkte.

Aber wo soll man die Grenze nun ziehen? — hier liegt der wunde Punkt. Die bei solchem Einsatz aufgenommenen Filme zeigen sehr eindrucksvoll ungläubliche Beanspruchungen und die Benutzer der Maschinen wiegen sich in wohliger Sicherheit, wenn sie das sehen. Es kann auch nicht bestritten werden, daß dadurch die Schäden, z. B. im Export, zurückgegangen sind. Aber was sagt der Kaufmann dazu? Sind die Maschinen dadurch nicht — oder vielleicht nur in gewisser Hinsicht — weit überdimensioniert worden? Die wirkliche Festigkeit der Bauteile für bestimmte Beanspruchungen kann man ja schwer übersehen. Vielleicht sind aber die entscheidend hohen Beanspruchungen noch gar nicht aufgetreten? Man hat von allen diesen Fragen nur einen subjektiven, aber keinen objektiven Eindruck.

### Der verfeinerte Einsatz

Besser ist es schon, wenn man bei einem forcierten Einsatz gleichzeitig auch die Kräfte mißt und sich allmählich ein Erfahrungsmaterial zulegt, was man von den Maschinen verlangen kann [6]. Dann kann man auf Prüfständen diese Kräfte anbringen und durch Spannungsmessungen feststellen, ob die Gestalt und der Werkstoff günstig gewählt wurden. Die Kenntnis der Lastkollektive [7; 8] ist notwendig, aber erst durch die richtige Konstruktion und den richtigen Werkstoff werden die Maschinen wirklich besser.

<sup>1)</sup> Wir messen die Eigenspannungen röntgenographisch.

**Der „Betriebsversuch“**

Wenn man etwa bei einem Fahrzeug auf guter Fahrbahn die Richtung der Kräfte und ihre Größenverteilung im Laufe der Zeit übersehen kann, kann man mit dem betreffenden Bauteil einen „Betriebsversuch“ machen, indem man es entsprechend dem Lastkollektiv stufenweise mit den entsprechenden Kräften und Frequenzen belastet und sieht, wie es sich verhält. Vielleicht wird man dann auch den Versuch mit geänderter Gestalt wiederholen. Auf diese Weise kann man Bauteile hochzüchten, aber auch nur in bezug auf die Dauerfestigkeit [9].

**Zusammenfassung**

Es wurde versucht, einen Überblick über die verschiedenen Arten der Festigkeitsanforderungen, ihre Bedingtheiten und Zusammenhänge zu geben. Auf die Ursachen, soweit sie der Ingenieur beherrschen kann, wurde besonders eingegangen [10]. Eine Betrachtung und Zergliederung des ganzen Komplexes der praktischen Beanspruchungen sollte wieder den Kontakt mit der täglichen Wirklichkeit des Einsatzes herstellen. Sie sollte u. a. zu einer Bescheidenheit hinsichtlich der Festigkeitsvorausagen, der Berechnungen usw. führen.

**Schrifttum**

- [1] *Kloth, W.*: Atlas der Spannungsfelder in technischen Bauteilen. Düsseldorf: Verlag Stahleisen 1961.
- [2] *Klöppel, K.*: Sicherheit und Güteanforderungen bei geschweißten Konstruktionen. In: Stahlbau-Handbuch. Köln: Stahlbau-Verlag GmbH. 1961.
- [3] *Radaj, D.*: Die Berücksichtigung der Spannungsfelder bei der Konstruktion von Schweißverbindungen. Grndl. d. Landtechn. Heft 14. Düsseldorf 1962. S. 19/26.
- [4] *Thiel, R.*: Kräfte im Schubkurbelgetriebe von Schlepper-Anbaumähwerken. Grndl. d. Landtechn. Heft 10. Düsseldorf 1958. S. 96/142.
- [5] *Stroppel, Th.*: Über die Gesetzmäßigkeiten des Kraftflusses im Getriebe eines Schlepper-Anbaumähwerkes. Landtechn. Forsch. **9** (1959) S. 129/39.
- [6] *Kloth, W.*: Konstruktive Grundlagenforschung. Landtechn. Forsch. **11** (1961) S. 76/79.
- [7] *Kloth, W.* u. *Th. Stroppel*: Kräfte, Beanspruchungen und Sicherheiten in den Landmaschinen. VDI-Z. **80** (1936) S. 85/92.
- [8] *Kahrs, M.*: Die Auslegung von Landmaschinenteilen nach Lastkollektiven. Landtechn. Forsch. **13** (1963) S. 171/79.
- [9] *Gassner, E.*: Betriebsfestigkeit. Eine Bemessungsgrundlage für Konstruktionsteile mit statistisch wechselnden Betriebsbeanspruchungen. Konstruktion **6** (1954) S. 97/104.
- [10] *Rühl, K. H.*: Die Tragfähigkeit metallischer Baukörper. Berlin: Ernst & Sohn 1952.