

Mitteilung aus dem Institut für landtechnische Grundlagenforschung der Forschungsanstalt für Landwirtschaft Braunschweig-Völkenrode

## Versuch einer kurzen, auf die Bedürfnisse des Konstrukteurs zugeschnittenen Darstellung von Ergebnissen der Dauerschwingfestigkeitsforschung

Von D. Radaj, Braunschweig-Völkenrode<sup>1)</sup>

Eine Vielzahl technischer Bauteile wird mit äußeren Kräften und Massenkräften belastet, die ihre Größe, ihre Lage und ihre Richtung im Laufe der Zeit ändern. Bauteile von Fahrzeugen, Flugzeugen, Hebezeugen, Landmaschinen und Werkzeugmaschinen sind vorwiegend einer derartigen zeitlich veränderlichen Belastung ausgesetzt. Bauteile von Schiffen, Brücken und Behältern weisen neben einer zeitlich veränderlichen eine vorwiegend ruhende Belastung auf. Die genannten Bauteile, die heute häufig unter Verwendung von Schweißverfahren hergestellt werden, müssen dauerschwingfest sein.

Als „dauerschwingfest“ bezeichnet man Bauteile, die beliebig lange mit zeitlich veränderlichen Kräften belastet werden können ohne zu brechen. Tritt nach längerer Belastungszeit ein Bruch ein, dann bezeichnet man den Bruch als Dauerschwingbruch und schreibt dem Bauteil eine „Zeitschwingfestigkeit“ zu.

Sollen die Bedingungen ermittelt werden, unter denen Dauerschwingfestigkeit oder ein gewisses Maß an Zeitschwingfestigkeit auftritt, dann gilt es, den physikalischen Vorgang zu untersuchen, den man einschränken und beherrschen will, nämlich den Bruch und das, was dem Bruch vorausgeht. Dem Bruch gehen Spannungsfelder in den Bauteilen voraus, unter denen sich der Werkstoff in ganz bestimmter Weise verhält, wobei der Grenz-zustand dieses Werkstoffverhaltens die Werkstofftrennung, der Bruch ist.

Auch wenn sich Spannungsfeld und Werkstoffverhalten gegenseitig bedingen, ist es sinnvoll, Spannungsfelder und Werkstoffverhalten weitgehend getrennt zu behandeln, nur so lassen sich die zahlreichen Beobachtungen und Erkenntnisse auf dem Wissensgebiet „Dauerschwingfestigkeit“ ordnen und übersichtlich darstellen. Es werden also zunächst die Spannungsfelder behandelt, dann das Werkstoffverhalten bei den verschiedenen Spannungsfeldern und schließlich die Anwendung der gewonnenen Erkenntnisse in der Praxis, einmal demonstriert an der mehr oder weniger abgeschlossenen Entwicklung der Kurbelwelle, zum anderen übertragen auf die noch mehr in den Anfängen steckende Entwicklung dauerschwingfester, geschweißter Konstruktionen.

### 1. Das Spannungsfeld

Wird ein Bauteil mit ruhenden Kräften, also insbesondere Eigen- und Fremdgewichten, belastet, dann baut sich in diesem Bauteil zunächst ein Spannungs- und Verzerrungszustand auf, der dadurch gekennzeichnet ist, daß bei Entlastung Spannungen und Verzerrungen auf Null zurückgehen. Das Bauteil verhält sich elastisch, Spannungen und Verzerrungen sind in diesem Bereich zueinander proportional, die Ausbildung der Spannungsfelder im Innern und auf der Oberfläche des Baukörpers ist von der Form des Bauteiles und der Lage der angreifenden Kräfte eindeutig bestimmt, unabhängig vom verwendeten Werkstoff [1 bis 9].

<sup>1)</sup> Vorgetragen auf der 20. Tagung der Landmaschinen-Konstrukteure in Braunschweig-Völkenrode am 6. 4. 1962 (Ergänzt n. d. Stand von 1964).

*Dr.-Ing. Dieter Radaj ist wissenschaftlicher Mitarbeiter der Forschungsgruppe für Spannung und Konstruktion (Leiter: Prof. Dr.-Ing.Dr.-agr.h.c.W. Kloth) im Institut für landtechnische Grundlagenforschung der Forschungsanstalt für Landwirtschaft, Braunschweig-Völkenrode.*

Wird das Bauteil höher belastet, dann wird zunächst an der höchst beanspruchten Stelle des Bauteiles die Fließgrenze überschritten. Für die Auslösung des Fließens ist ein bestimmter, werkstoffabhängiger Wert der Schubspannung oder der Gestaltungsänderungsenergie maßgebend. Bei weiterer Belastung vergrößern sich die plastischen Bereiche. Spannung und Verzerrung sind in den plastischen Bereichen nicht mehr zueinander proportional. Bei ideal-plastischem Werkstoff können beliebige Verzerrungen ohne Spannungserhöhung auftreten, andere Werkstoffe verfestigen sich mit wachsender plastischer Verzerrung, die Spannung nimmt mit wachsender Verzerrung nach irgendeinem komplizierten Gesetz zu. Die Spannungsfelder sind dann nicht nur von der Form des Bauteiles und der Lage der angreifenden Kräfte, sondern auch vom Werkstoff abhängig [12 bis 14].

Wird ein Bauteil mit zeitlich veränderlichen Kräften belastet, seien es nun periodisch veränderliche oder einmalig stoßweise wirkende Kräfte, dann verhält es sich anders als unter ruhenden Kräften. Bei niedriger Belastungshöhe ändert sich nichts am Verhalten des Werkstoffes, dieser reagiert wieder rein elastisch, wobei der Elastizitätsmodul unabhängig von der Beanspruchungsgeschwindigkeit ist. Im Gegensatz zur ruhenden Belastung treten aber mit wachsender Belastungsgeschwindigkeit die Massenkräfte immer stärker in Erscheinung. Es breiten sich in den Baukörpern elastische Spannungs- und Verzerrungswellen aus, die mit werkstoffeigener Schallgeschwindigkeit die Bauteile durchlaufen, reflektiert werden und sich überlagern. Im Falle einmaliger Belastung klingen die Spannungswellen aufgrund der Werkstoff- und Reibungsdämpfung im Laufe der Zeit ab. Bei periodischer Erregung bilden sich stehende Spannungswellen, deren Amplitude in Resonanzpunkten sehr groß sein kann, aber schließlich ebenfalls durch innere und äußere Reibung begrenzt wird. Die Spannungsfelder bei zeitlich veränderlicher Belastung sind im elastischen Bereich von der Form des Bauteiles, der Lage der angreifenden Kräfte, der Massenverteilung und dem zeitlichen Ablauf der Belastung abhängig [10, 11].

Bei steigender Belastungshöhe setzt auch bei zeitlich veränderlicher Belastung zunächst an den höchstbeanspruchten Stellen des Bauteiles ein Fließen ein. Die für das Fließen maßgebende Schubspannung ist abhängig vom Werkstoff, von der Verzerrung und von der Verzerrungsgeschwindigkeit. Genau so wie bei elastischem Werkstoffverhalten von „elastischen Wellen“ gesprochen wird, wird bei plastischem Materialverhalten von „plastischen Wellen“ gesprochen. Die Geschwindigkeit der plastischen Wellen ist z. T. wesentlich kleiner als die der elastischen Wellen [15].

Die genannten ruhenden und zeitlich veränderlichen Spannungsfelder überlagern sich ständig den Eigenspannungen des Bauteiles. Eigenspannungen werden verursacht durch ungleichmäßige plastische Verzerrungen bei der Herstellung und im Betrieb des Bauteiles. Eigenspannungen entstehen im Betrieb, wenn ein Bauteil, das Fließerscheinungen in bestimmten Gebieten aufweist, entlastet wird. Elastisch gebliebene Gebiete wollen vollständig „zurückfedern“, werden daran aber von plastisch verzerrten Gebieten gehindert, denen sie elastische Spannungen umgekehrten Vorzeichens aufzwingen. Eigenspannungen entstehen bei der Herstellung u. a. dadurch, daß beim Abkühlen aus dem flüssigen oder knetbaren Zustand die Außenschicht zuerst erkaltet und damit auch die volle Festigkeit erreicht. Die Folge davon ist eine Druckhaut, die derartige Proben umgibt.

Die Eigenspannungen bleiben bei einem zeitlich veränderlichen Belastungsablauf auch nicht dieselben. Eine einzige Überbelastung in nur einer Richtung verursacht an den höchstbeanspruchten Stellen ein Eigenspannungssystem, welches bei schweller Beanspruchung im Sinne eines Spannungsspitzenabbaues wirkt. Alle Eigenspannungssysteme erfahren außerdem im Verlauf einer zeitlich veränderlichen Belastung einen Spannungsabbau, dessen Ursachen noch weitgehend ungeklärt sind.

Durch ungleichmäßige Erwärmung des Bauteiles können neben den Eigenspannungen Wärmespannungen auftreten. Die Wirkung der Eigenspannungsfelder und Wärmespannungsfelder auf die ruhenden und zeitlich veränderlichen Lastspannungsfelder ist die, daß einmal die Lastspannung, bei der das Fließen einsetzt, sich ändert, zum anderen die, daß die Ausbreitung der plastischen Bereiche neuen Gesetzen folgt.



**Bild 1.** Ausbildung von Gleitspuren an der Oberfläche einer  $\alpha$ -Eisen-Dreikristallprobe in Abhängigkeit von der Beanspruchungsdauer nach Hempel, Kochendörfer und Hillnhagen [22]. (Phasenkontrastaufnahmen, Maßstab 200:1).

Spannungsausschlag:  $\pm 14,6 \text{ kp/mm}^2$ , Bruchlastspielzahl:  $1,675 \cdot 10^6$   
 $N = 0,025 \cdot 10^6$ ,  $N = 0,1 \cdot 10^6$ ,  $N = 0,25 \cdot 10^6$

Aus all diesen Betrachtungen über Spannungsfelder ist ersichtlich, daß die tatsächlich auftretenden Spannungen u. U. nur noch wenig zu tun haben mit den in den Berechnungsvorschriften verankerten „Nennspannungen“. „Nennspannungen“ sind bekanntlich fiktive Spannungen, die unter Verwendung idealisierter Lastannahmen unter Zugrundelegung idealisierter Spannungsverteilungen errechnet werden. Trotzdem der Konstrukteur beim Entwurf auf die Nennspannungen angewiesen ist, kann die weitere Verbesserung der Konstruktion nur von den wirklich auftretenden Spannungsfeldern ausgehen.

## 2. Das Werkstoffverhalten im Spannungsfeld

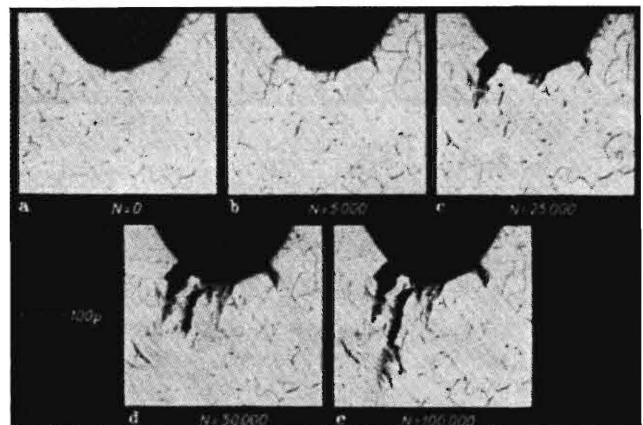
### 2.1 Aussagen der Festkörperphysik

Bekanntlich besteht das metallische Gefüge aus Kristalliten oder Körnern in der Größe von 0,01 bis 10 mm, die dadurch gekennzeichnet sind, daß in ihnen eine chemisch bestimmte Zustandsphase und eine physikalisch bestimmte Kristallrichtung vorliegen. Die Kristallite bestehen aus Kristallen, die durch die bekannte regelmäßige Atomanordnung gekennzeichnet sind, deren Oberfläche aber nicht frei gewachsen ist, sondern unter Zwang als Stoßfläche der aus der Schmelze um verschiedene Kristallisationskerne gebildeten Kristallkörper. Die Stoßflächen werden als Korngrenzen bezeichnet. Diese Materialstruktur und ihre Änderungen bei der Schwingbeanspruchung kann röntgenographisch und metallographisch, also licht- und elektronenmikroskopisch, verfolgt werden.

Die bisher vorliegenden Untersuchungen geben das folgende Bild [16 bis 20]. Es treten bei der Schwingbeanspruchung ebenso wie bei der ruhenden Beanspruchung schon in dem Bereich, der noch als elastisch bezeichnet wird, Gleitungen in den Kristalliten auf. Nach **Bild 1** nimmt die Zahl dieser Gleitungen mit der aufgetragenen Lastspielzahl zu. Die Gleitungen treten zuerst in den Kristalliten auf, deren Kristallachsen besonders ungünstig zur Beanspruchungsrichtung orientiert sind. Erheblich begünstigt wird die Ausbildung der Gleitbereiche an Korngrenzen

durch die dort herrschende Anisotropie. Noch stärker fördern nichtmetallische Einschlüsse das Entstehen der Gleitungen. Wie zu erwarten, treten bei Baukörpern mit Spannungsspitzen die ersten Gleitungen am Ort der Spannungsspitze auf und bleiben zunächst auf diesen Bereich beschränkt, **Bild 2**.

Welches ist der Mechanismus dieser Gleitungen? Um den Einfluß der Korngrenzen und nichtmetallischen Einschlüsse auf die Verzerrungsvorgänge auszuschalten, hat man Metalle in chemisch sehr reiner Form dargestellt. Man hat sogenannte „Einkristalle“ gezüchtet, die das Einzelkorn des vielkristallinen Werkstoffes repräsentieren. Bei der plastischen Verzerrung dieser Einkristalle, die an eine elastische Verzerrung anschließt, gleiten einzelne Kristallteile auf ganz bestimmten kristallographischen Ebenen, den Gleitebenen, entlang ganz bestimmter Richtungen, den Gleitrichtungen, ab, wobei sich ein anfangs kreisförmiger Querschnitt

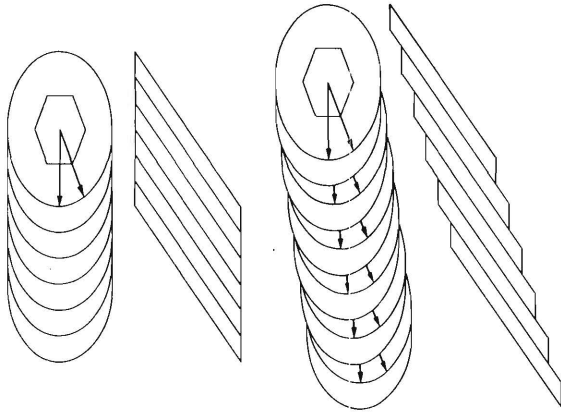


**Bild 2.** Ausbreitung der Gleitlinien an biegewechselbeanspruchten Kerbproben aus Stahl mit 0,09% C nach Hempel [23].

V-Kerb:  $60^\circ$ ,  $t = 1,5 \text{ mm}$ ,  $r = 0,1 \text{ mm}$ ; Spannungsanschlag:  $\pm 14,0 \text{ kp/mm}^2$ .

elliptisch verformt. Diesen Vorgang zeigt **Bild 3**. Als Gleitebenen wirken dabei solche Kristallebenen, die am dichtesten mit Atomen besetzt sind. Das Gleiten wird ausgelöst von einer bestimmten kritischen Schubspannung in der Gleitebene, die unabhängig ist von der gleichzeitig in dieser Ebene herrschenden Normalspannung. Bei wachsender Verzerrung nimmt die kritische Schubspannung zu, der Einkristall verfestigt sich. In jedem Fall ist aber die beobachtete kritische Schubspannung bei Einkristallen etwa zwei Größenordnungen kleiner als beim vielkristallinen Werkstoff, was auf die Wirkung der Korngrenzen und nichtmetallischen Einschlüsse zurückzuführen ist. Sie beträgt andererseits nur  $1/1000$  derjenigen Schubspannung, die sich aus den Bindungskräften der Atome für die Verschiebung einer ganzen Atomebene in einem fehlerfreien Kristall errechnen läßt.

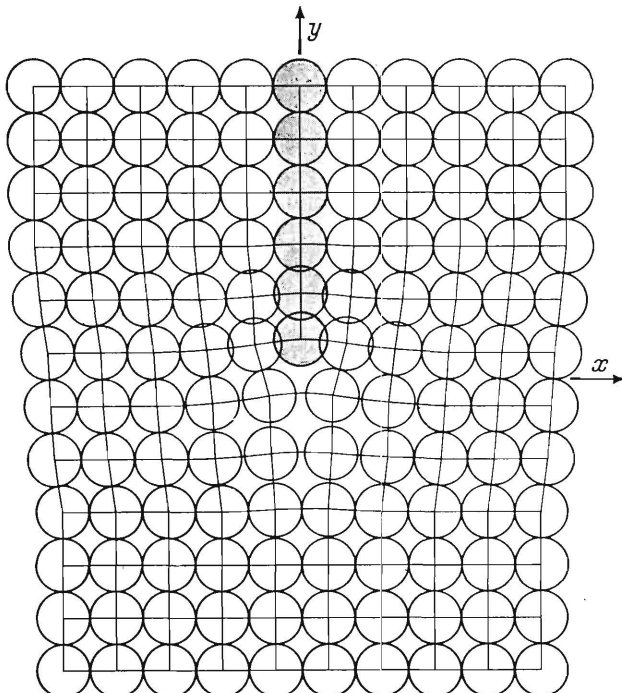
Eine Erklärung für diese Unstimmigkeiten gibt die Versetzungstheorie. Wirkliche Kristalle weisen Baufehler im Gitter, z. B. durch fehlende oder falsch eingebaute Atome, auf. Diese örtlichen Fehlanordnungen, die in großer Zahl bereits beim Wachstum der Kristalle entstehen, werden „Versetzungen“ genannt. Versetzungen stellen immer eine Gitterverzerrung dar und sind mit Eigenspannungen verbunden, die mit der Entfernung von der Versetzung abklingen.



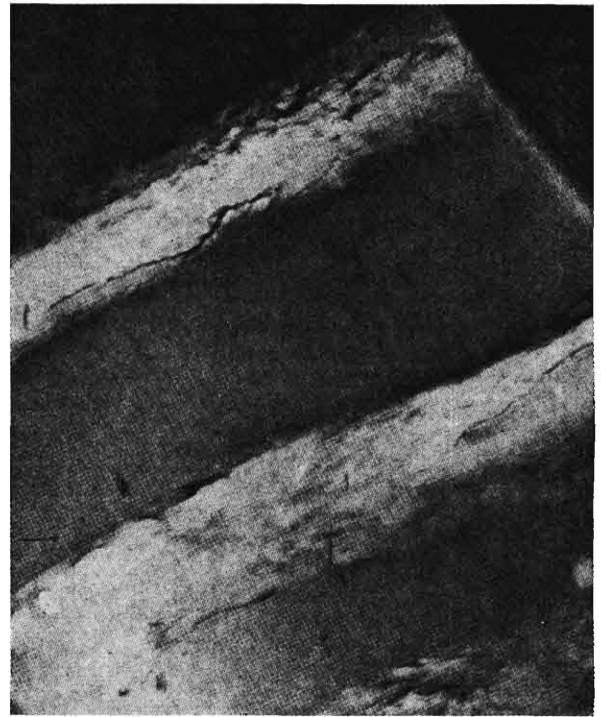
**Bild 3.** Gleitvorgang beim hexagonalen Einkristall nach Schmid und Boas [16]. Der linke Pfeil gibt die Richtung größter Neigung der Gleitebene an, der rechte Pfeil die Gleitrichtung.

Wird eine Schubspannung diesem Eigenspannungssystem überlagert, dann beginnt die Versetzung in Richtung Rand oder in Richtung einer Versetzung entgegengesetzten Vorzeichens zu wandern. Die wandernden Versetzungen stauen sich an Fremdatomen und an Versetzungen anderer Gleitebenen oder fallen ganz aus. Eine Folge der abnehmenden Zahl der Versetzungen ist die Verfestigung des Kristalls. Der Veranschaulichung dient die schematische Darstellung in **Bild 4**. Die dort eingezeichneten Kreise sollen die Atome in der regelmäßigen Anordnung des Kristallverbandes darstellen. Eine Versetzung tritt in der Mitte der oberen Bildhälfte auf. Eine Verschiebung der oberen Kristallhälfte gegenüber der unteren Kristallhälfte in waagerechter Richtung hat man sich nun so vorzustellen, daß die Versetzung in waagerechter Richtung zu wandern beginnt. Es ist verständlich, daß zu dieser Verschiebung von jeweils nur einer Atomenebene eine wesentlich kleinere Schubspannung notwendig ist als für die gleichzeitige Verschiebung sämtlicher Atomenebenen.

Aus dem Erscheinen der Gleitlinien läßt sich das Entstehen der ersten Anrisse noch nicht erklären. Es gibt zwar über den Mechanismus des Bruchvorganges eine große Zahl von Theorien, die sich aber z. T. widersprechen und deshalb hier nicht einzeln genannt werden. Als gesichertes Erkenntnis kann lediglich gelten, daß die ersten Anrisse an der Oberfläche der Gleitlinien nach



**Bild 4.** Positive Stufenversetzung eines Schnittes senkrecht zur Gleitebene nach Kochendörfer [24]. Die Kreise stellen die Atome im Kristallgitter dar.



**Bild 5.** Oberflächenrisse an Gleitbändern von St 37 nach kurzzeitiger Biegewechselbeanspruchung nach Wever, Hempel und Schrader [25].

Elektronenmikroskopische Aufnahme eines Lackabdruckes, Maßstab 8000:1. Spannungsausschlag:  $\pm 19 \text{ kp/mm}^2$ , Lastspielzahl:  $1,56 \cdot 10^6$ .

**Bild 5** beobachtet werden. Auch wenn bei der Auslösung des ersten Anrisses Zugspannungen notwendigerweise eine wesentliche Rolle spielen, weist die Tatsache, daß die ersten Anrisse an der Oberfläche der Gleitlamellen beobachtet werden, darauf hin, daß Schubspannungen entscheidend für die Bruchentstehung sind. Ohne Schubspannungen keine plastischen Verzerrungen, ohne plastische Verzerrungen kein Dauerschwingbruch. Die mikroskopischen Risse weiten sich unter der Kerbwirkung des Reißendes zu makroskopischen Rissen aus, können aber auch zum Stillstand kommen, wenn eine gewisse Energieschwelle nicht überschritten wird. Der Bruchweg folgt in jedem Fall einer Normalen zu den ursprünglichen  $\sigma_1$ -Hauptspannungslinien, trotzdem der wachsende Riß das Spannungsfeld verändert. Die Bruchgeschwindigkeit nimmt mit der Rißtiefe zu. Hat der Riß eine genügende Tiefe erreicht, dann reicht die Spannung im Restquerschnitt aus, einen Gewaltbruch zu ver-



**Bild 6.** Dauerschwingbruch einer Exzenterwelle von 230 mm Durchmesser nach Pohl [26].

A Ausgangspunkt des Bruches, D Dauerbruch, G Gewaltbruch, R Rastlinien



ursachen. Das Bruchbild setzt sich nach **Bild 6** zusammen aus einer matten, samtartigen Dauerschwingbruchfläche und einer groben, zerklüfteten Restbruchfläche. Die Dauerschwingbruchfläche weist Rastlinien auf, die Ruhepausen oder Lastspitzen kennzeichnen. Die Form der Bruchfront und die Lage des Restbruches läßt Rückschlüsse zu auf die Lage der Kräfte, die den Bruch verursacht haben, das Verhältnis von Restbruchfläche zu Dauerschwingbruchfläche läßt Rückschlüsse zu auf die Größe dieser Kräfte.

Eine auf der Versetzungstheorie aufbauende erste Theorie zur näherungsweise Beschreibung der Vorgänge beim Dauerschwingbruch ist bereits entwickelt worden [21].

2.2 Aussagen der technologischen Mechanik

Den Untersuchungen über das Verhalten des Werkstoffes nach Methoden der Festkörperphysik stehen zahlreiche Untersuchungen nach Methoden der technologischen Mechanik gegenüber [27 bis 41].

Die technologische Mechanik läßt die Kristallitstruktur des Werkstoffes unberücksichtigt, sieht den Werkstoff also als homogen und isotrop an. Sie geht aus von glatten Zugstäben definierter Form und Größe, deren Dauer- und Zeitschwingfestigkeit nach dem bekannten Wöhlerverfahren bestimmt wird. Die Proben werden mit Kräften belastet, deren Größe sich sinusförmig ändert. Je nach Lastgröße erhält man unterschiedlich hohe, bis zum vollständigen Bruch ertragene Lastspielzahlen. Dieser Sachverhalt wird im halblogarithmischen Maßstab als sogenannte Wöhlerkurve dargestellt. Die Wöhlerkurve läßt sich näherungsweise durch eine Potenzfunktion darstellen, aus der hervorgeht, daß eine kleine Verminderung der Beanspruchung eine große Erhöhung der ertragenen Lastspielzahl, also der Lebensdauer, zur Folge hat. Den stärksten Einfluß auf die Lage der Wöhlerkurve haben die Art des Werkstoffes, die Vorspannung und die Oberflächenbeschaffenheit.

Es ist bekannt, in welcher Weise die Dauerschwingfestigkeit von der Werkstoffart abhängt. In erster Näherung kann ein Zusammenhang zwischen statischen Festigkeitswerten und Schwingfestigkeitswerten festgestellt werden. Hohe Zugfestigkeit eines Werkstoffes bedeutet auch hohe Schwingfestigkeit. Das Verhältnis von Schwingfestigkeit zur Zugfestigkeit, kurz „Schwingfestigkeitsverhältnis“ genannt, kann dabei sehr unterschiedliche Werte annehmen, für Stahl mit einer Zugfestigkeit bis 120 kp/mm<sup>2</sup> liegt es zwischen 0,4 und 0,6. Die Nenndauerfestigkeiten verschiedener Werkstoffe lassen einen Werkstoffvergleich unter dem Gesichtspunkt des Leichtbaus zu, wenn bestimmte Vorspannung und bestimmte Oberflächengüte zugrunde gelegt werden. In **Bild 7** ist die durch die Dichte dividierte Schwingfestigkeit einiger Werkstoffe in Abhängigkeit von den spezifischen statischen Festigkeiten aufgetragen. Es fällt die hohe spezifische Schwingfestigkeit von Stahl und Titanlegierungen ins Auge, aber auch Festhölzer, Leichtmetalle und Kunststoffe weisen für den Leichtbau interessante Festigkeiten auf. Bei der Verwendung des für jeden Werkstoff bekannten Nennfestigkeitswertes muß aber beachtet werden, daß die tatsächliche Festigkeit des angelieferten Werkstoffes je nach den Herstellungsbedingungen stark schwanken kann. Innere Werkstofffehler (Oxyd- und Schlackenzeilen) vermindern die Dauerschwingfestigkeit eines unberührt vergossenen Thomas-Stahles gegenüber dem beruhigt vergossenen Stahl von 23 kp/mm<sup>2</sup> auf 17 kp/mm<sup>2</sup>. Schmieden verfeinert grobes Gußgefüge und erhöht die Dauerschwingfestigkeit, sofern Schlackenzeilen und Seigerungszonen in Richtung der größten Beanspruchung gebracht werden können. So erhöht die Feinkörnigkeit eines ausgewalzten Stabes nur die Biegewechselfestigkeit dieses Stabes, nicht die Torsionswechselfestigkeit. Im ersten Fall fällt die  $\sigma_1$ -Hauptspannungsrichtung und die Richtung der Schlackenzeilen zusammen, letztere sind daher ohne Einfluß auf die Festigkeit. Im zweiten Fall liegen die  $\sigma_1$ -Hauptspannungsrichtung und die Richtung der Schlackenzeilen unter 45° zueinander, der Festigkeitserfolg durch Feinkörnigkeit wird daher durch das Entstehen der Schlackenzeilen aufgehoben.

Weiter ist bei der Verwendung eines bestimmten Nennfestigkeitswertes zu beachten, daß plastische Kaltverzerrungen bei der Herstellung einen Werkstoff verfestigen und die Dauerschwingfestigkeit um 50% und mehr erhöhen, wie es bei dünnen Drähten und Blechen der Fall ist. Wärmebehandlungen, wie das Härten und Vergüten, verbessern ebenso die Dauerschwingfestigkeit, wenn verzünderte und entkohlte Randschichten nachbearbeitet werden.

In manchen Fällen kommt es auf die Schwingfestigkeit bei hoher oder tiefer Temperatur an. Es gibt hochwärmefeste Legierungen, die bis zu 900°C hohe Schwingfestigkeit aufweisen. Die Schwingfestigkeit bei tiefen Temperaturen ist im allgemeinen höher als bei normalen Temperaturen.

Im vorangegangenen wird eine einachsige Normalspannung zur Kennzeichnung der Dauerschwingfestigkeit benutzt. Es stellt sich die Frage, welche Vergleichsspannung bei mehrachsigen Spannungszuständen zur Kennzeichnung der Bruch-

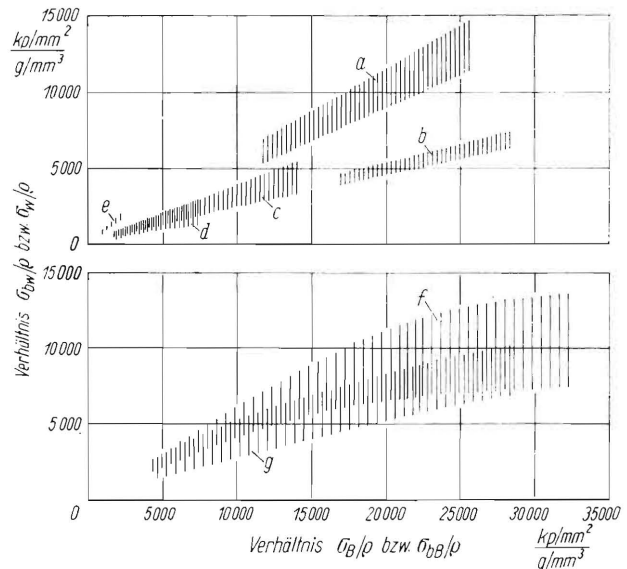


Bild 7. Werkstoffvergleich nach Hempel [38].

- a Titanlegierungen
- b Festhölzer
- c Kunststoffe
- d Sinterwerkstoffe
- e keramische Massen
- f Stähle
- g Aluminium-Knet- und Strangpreßlegierungen

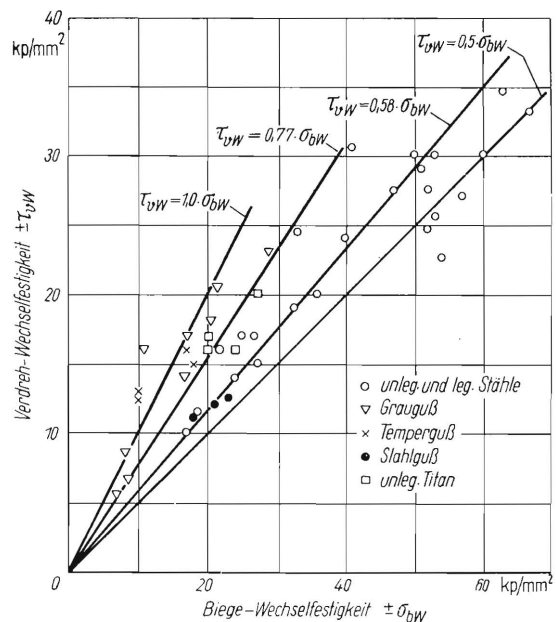


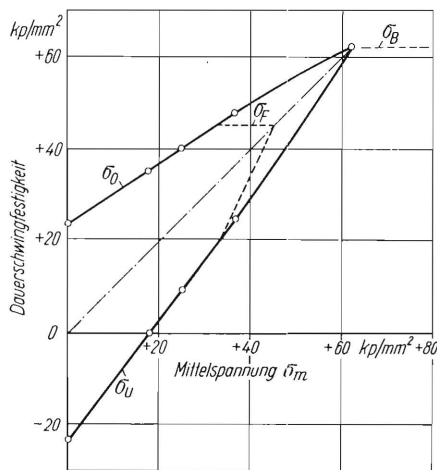
Bild 8. Biege- und Verdrehwechselfestigkeit einiger Werkstoffe nach Hempel [38].

- nach Größtnormalspannungshypothese:  $\tau_{vW} = 1,00 \sigma_{bW}$
- nach Größtdehnungshypothese:  $\tau_{vW} = 0,77 \sigma_{bW}$
- nach Gestaltsänderungsenergiehypothese:  $\tau_{vW} = 0,58 \sigma_{bW}$
- nach Größtschubspannungshypothese:  $\tau_{vW} = 0,50 \sigma_{bW}$



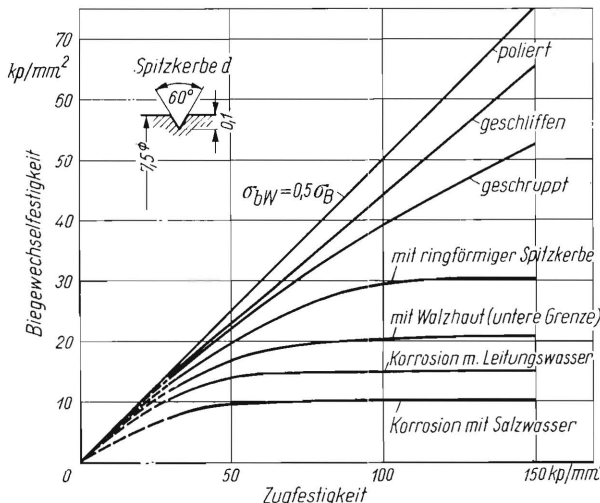
gefahr verwendet werden soll. Die Betrachtungen über den Bruchmechanismus lassen vermuten, daß die gleichzeitige Wirkung von Schub- und Normalspannungen entscheidend ist. Tatsächlich muß je nach Werkstoff die Gestaltänderungsenergiehypothese (Stahl, Stahlguß) oder die Größtdehnungs- oder Größtnormalspannungshypothese (Grauguß, Temperguß) angewendet werden, **Bild 8**.

Neben der Werkstoffart ist die Vorspannung entscheidend für die Höhe der Dauerschwingfestigkeit. Die Wirkung verschiedener Vorspannungen kann an sog. „Dauerschwingfestigkeitsschaubildern“ verfolgt werden. Nach **Bild 9**, das ein typisches Dauerschwingfestigkeitsschaubild zeigt, nimmt die ertragbare Spannungsamplitude mit wachsender Vorspannung ab, infolge der Verfestigung des Materials sind jedoch Vorspannungen bis über die Fließgrenze möglich, der Werkstoff kann auch dann noch eine Spannungsamplitude begrenzter Größe aushalten. In der technischen Praxis wird das Dauerschwingfestigkeitsschaubild bei höheren Vorspannungswerten meist durch die gestrichelt eingezeichneten Linien begrenzt, eine Beanspruchung oberhalb der Fließgrenze wird nicht zugelassen.



**Bild 9.** Dauerschwingfestigkeit eines 20 mm dicken Bleches mit Walzhaut aus St 52 in Abhängigkeit von der Vorspannung nach Roß und Eichinger [31].

Da die Dauerschwingbrüche häufig von inneren oder äußeren Oberflächen ausgehen, sind spezifische Randschichteigenschaften wie Oberflächenrauigkeit, Druckspannungsschicht, Korngröße an der Oberfläche und Korrosionsverhalten von großem Einfluß auf die Dauerschwingfestigkeit. Wie aus **Bild 10** hervorgeht, ist der Einfluß der Randschicht besonders groß bei hochfesten Stählen. Die hohe Festigkeit dieser Stähle kann nur dann ausgenutzt werden, wenn für einwandfreie Oberflächen gesorgt wird.



**Bild 10.** Einfluß der Oberfläche auf die Dauerschwingfestigkeit nach Arbeitsblatt Nr. 1 des Fachausschusses für Maschinenelemente beim VDI [30].

Oberflächenverbesserungen werden erzielt durch mechanische, thermische und chemische Verfahren. Als Beispiel seien genannt das Schleifen und Polieren, das Oberflächendrücken, das Kugelstrahlen, das Aufbringen metallischer und nichtmetallischer Überzüge, das Nitrieren, Einsatz- und Flammenhärten.

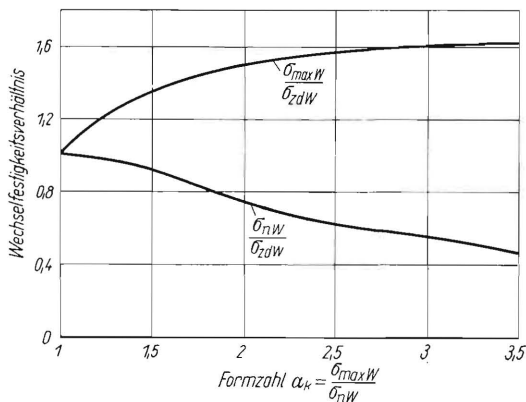
Eine Übertragung der an glatten Zugstäben mit dem Einstufen-Wöhlerversuch gewonnenen Festigkeitswerte auf beliebig gestaltete Bauteile, die beliebige Lastfolgen aushalten müssen, stößt auf erhebliche Schwierigkeiten. Um Arbeitsregeln zu finden, nach denen diese Übertragung vorgenommen werden kann, sind einmal gekerbte Stäbe unter verschiedenen Belastungsarten untersucht worden, zum anderen „Lastkollektive“ verschiedener Form.

Der gekerbte Stab soll ein Bauteil mit Spannungsspitze repräsentieren. Sein Verhalten ist nicht nur kennzeichnend für eigentliche Kerben, sondern für alle Bauteile, die infolge von Formunstetigkeiten Spannungsspitzen aufweisen. Prüft man einen gekerbten Stab im Dauerschwingversuch, dann stellt man fest, daß die Spannungsspitze entscheidend ist für die Dauerschwingfestigkeit, dies oft im Gegensatz zur Festigkeit bei ruhender Belastung, bei deren Ermittlung Spannungsspitzen durch örtliches Fließen abgebaut werden können. Allerdings ist der Einfluß der Spannungsspitze werkstoffabhängig. Bei hochfesten Stählen wirkt eine Spannungsspitze voll festigkeitsmindernd, man spricht von hoher „Kerbempfindlichkeit“ dieser Stähle. Bei Stählen normaler Festigkeit wirkt die Spannungsspitze auch festigkeitsmindernd, die Spannungsspitze wird jedoch teilweise durch etwas höhere Werkstofffestigkeit aufgefangen, **Bild 11**.

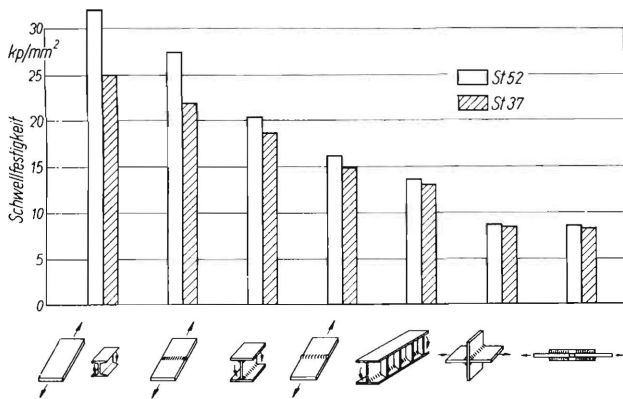
In **Bild 11** ist die im Wöhlerversuch bei Zug-Druck- und Biege-wechselbeanspruchung glatter und gekerbter Stäbe ohne Bruch ertragene Spannungsspitze, die Wechselfestigkeit  $\sigma_{max W}$ , und die zugehörige errechnete ohne Bruch ertragene Nennspannung, die Wechselfestigkeit  $\sigma_{n W}$ , in Abhängigkeit von der relativen Höhe der Spannungsspitze, gekennzeichnet durch die Formzahl  $a_k$ , aufgetragen. Um mehrere Werkstoffe in einer Kurve zusammenfassen zu können, sind beide Spannungen auf die bei Zug-Druckbeanspruchung des glatten Stabes ohne Bruch ertragene Spannung, die Wechselfestigkeit  $\sigma_{zd W}$ , bezogen. Die Nennspannung  $\sigma_{n W}$  errechnet sich für glatte und gekerbte Stäbe bei Zug und Druck unter der Annahme konstanter Spannungen im kleinsten Querschnitt und bei Biegung unter der Annahme konstanter Spannungen in der Zug- und Druckzone des Stabes im kleinsten Querschnitt. Unter Formzahl  $a_k$  wird das Verhältnis von Spannungsspitze  $\sigma_{max W}$  zur Nennspannung  $\sigma_{n W}$  verstanden. Es ist zu beachten, daß nach den gegebenen Definitionen dem gebogenen glatten Flachstab die Formzahl  $a_k = 1,5$ , dem gebogenen glatten Rundstab die Formzahl  $a_k = 1,7$  zugeordnet ist. **Bild 11** läßt erkennen, daß jede Verminderung der Formzahl die ertragene Nennspannung merklich erhöht. Wie später gezeigt wird, haben schon kleine Verminderungen der Formzahl, also der Spannungsspitze, eine wesentliche Erhöhung der Lebensdauer zur Folge.

Die Kurven in **Bild 11** stellen Mittelwerte von merklich streuenden Versuchsergebnissen dar. Diese Streuung erklärt sich aus der Tatsache, daß nicht nur Werkstoff und Spannungsspitze die tatsächliche ertragene Spannung bedingen, sondern auch in geringerem Maße die Vorspannung, die Oberflächenbeschaffenheit, die Bauteilform, die Art der Belastung, die Bauteilgröße. Es ist versucht worden, insbesondere einen Zusammenhang zwischen der Steilheit der Spannungsspitze, dem „Spannungsgefälle“ bzw. der Bauteilgröße und der Dauerschwingfestigkeit festzustellen. Die Versuchsergebnisse widersprechen sich jedoch, wohl in erster Linie deshalb, weil sich bei den genannten Versuchen die Wirkung der Oberflächenschicht nicht ausschalten läßt.

Wenn hochfeste Stähle als besonders „kerbempfindlich“ gekennzeichnet werden, dann bedeutet dies, daß bei Verwendung dieser Werkstoffe auf die Verminderung der Spannungsspitzen besonders geachtet werden muß. Bei kompliziert geformten Schweißverbindungen bringt schon die Verwendung von St 52 keinen Vorteil, **Bild 12**.



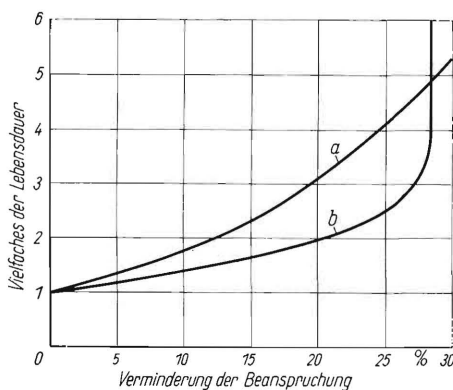
**Bild 11.** Zug-Druck- und Biegewechselfestigkeit glatter und gekerbter Stäbe aus St N, St 50, Cr-Ni-Mo-Stahl und 5%-Ni-Stahl, bezogen auf die Zug-Druck-Wechselfestigkeit des glatten Stabes in Abhängigkeit von der Formzahl nach Roß und Eichinger [31].



**Bild 12.** Schwelfestigkeit von Schweißverbindungen aus St 37 und St 52 nach Neumann [35].

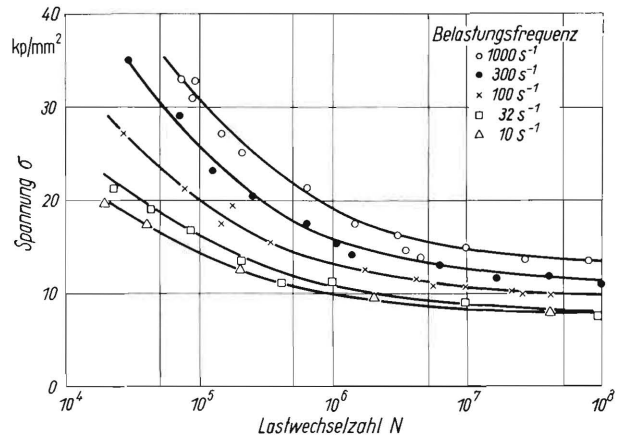
Die zweite Vereinfachung, von der bei der technologischen Mechanik Gebrauch gemacht wird, betrifft den Spannungsablauf. Dieser entspricht im allgemeinen nicht einer Sinusschwingung und ist im allgemeinen überhaupt nicht streng periodisch. Im Hinblick auf die Dauerschwingfestigkeit wird der Spannungsablauf beschrieben durch ein „Spannungskollektiv“, welches sich bei einfachen Belastungsverhältnissen auf ein „Lastkollektiv“ zurückführen läßt. Das „Lastkollektiv“ gibt die Häufigkeit, mit der eine bestimmte Last über- bzw. unterschritten wird, in Abhängigkeit von dieser Last an. Die unter den Lastkollektiven ermittelten Wöhlerkurven, die von den nach der herkömmlichen Methode ermittelten Wöhlerkurven zum Teil erheblich abweichen, bilden die Grundlage einer optimalen Dimensionierung dauerschwingbeanspruchter Bauteile.

Es liegt nahe, im Rahmen der statistischen Betrachtungsweise auch die Streuung der Festigkeit bei den heute üblichen und



**Bild 13.** Erhöhung der Lebensdauer im Zeitfestigkeitsbereich (a) und im Dauerfestigkeitsbereich (b) durch Erniedrigung der Beanspruchung nach Erker [41].

möglichen Prüfverfahren zu berücksichtigen. Selbst bei sorgfältigster Herstellung streuen sowohl die Werkstofffestigkeit als auch die tatsächlich aufgebrachten Lasten, und es ergibt sich eine Gauß'sche Normalverteilung für den Logarithmus der ertragenen Lastspielzahl. Unter Verwendung statistischer Methoden können so Wöhlerkurven für genau definierte Bruchwahrscheinlichkeiten ermittelt werden. Sie bilden die Grundlage für die Bestimmung der in Abhängigkeit von der Lasterniedrigung zu erwartenden Lebensdauererhöhung, **Bild 13**.

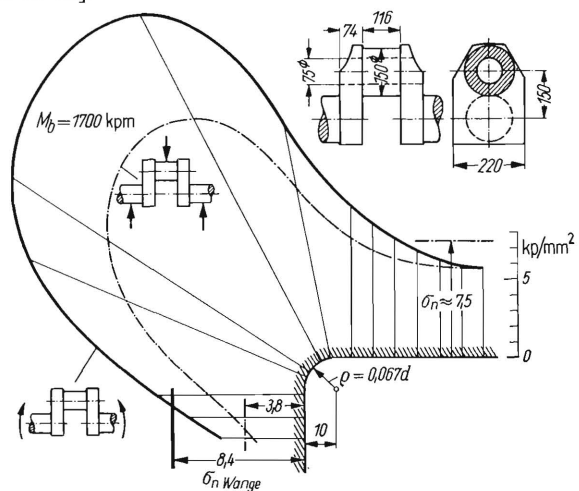


**Bild 14.** Einfluß der Belastungsfrequenz auf die Dauerschwingfestigkeit von AlCuMg nach Harris [42].

Die Kennzeichnung der Belastungsabläufe durch Lastkollektive läßt den Einfluß der Belastungsgeschwindigkeit bzw. der Belastungsfrequenz unberücksichtigt. Dies ist nur dann zulässig, wenn die Massenkkräfte vernachlässigt werden können und wenn die Werkstofffestigkeit unabhängig von der Lastfrequenz ist. Ändert sich das Spannungsfeld mit der Lastfrequenz infolge von Massenkkräften oder ist die Werkstofffestigkeit von der Lastfrequenz abhängig, **Bild 14**, dann reicht das Lastkollektiv zur Kennzeichnung des Belastungsablaufes nicht aus.

### 3. Die dauerschwingfeste Konstruktion

Es stellt sich die Frage, in welcher Weise die vorhandenen Erkenntnisse in die technische Praxis zu übersetzen und welche der genannten Einflußgrößen bei der Entwicklung dauerschwingfester Konstruktionen besonders zu beachten sind. Dazu wird ein hochentwickeltes dauerschwingfestes Bauteil, die Motor-kurbelwelle, betrachtet. An ihr wird die Wirksamkeit möglicher belastbarkeitserhöhender Maßnahmen, die sich im Laufe der Entwicklung ergeben haben, unter Verwendung von Angaben im Schrifttum abgeschätzt. Dieser Schätzung wird eine bereits als brauchbar anzusehende Konstruktionsform zugrunde gelegt [43 bis 48].



**Bild 15.** Spannungsverteilung in der Hohlkehle des Kurbelzapfens einer biegebeanspruchten Kurbelkröpfung nach Messungen der Bundesanst. f. Materialprüf. [47].

Die größten Erfolge bei der Belastbarkeitserhöhung von Kurbelwellen erzielte man durch bessere Formgebung, die sich an einer Verkleinerung der örtlichen Spannungsspitzen orientierte. Bekanntlich wird die Kurbelwelle mit den vom Pleuel übertragenen Gas- und Massenkräften und mit eigenen Massenkräften belastet, wobei Biege- und Drehmomente auftreten. Da die Spannungsspitzen bei Biegung der Kurbelwelle im allgemeinen merklich höher sind als bei Verdrehung, wurden die Spannungen meist mit der Biegebelastung ermittelt. Wegen der verwickelten Form der Kurbelwelle konnten die Spannungen nur experimentell ermittelt werden. Dabei wurden die Kräfte sehr langsam, also nahezu ruhend aufgebracht, außerdem wurde elastisches Werkstoffverhalten vorausgesetzt, beides Maßnahmen zur Vereinfachung der Versuchsdurchführung. Die höchsten Spannungen wurden nach Bild 15 am inneren Übergang zwischen Zapfen und Wange ermittelt, die Brüche traten nach Bild 16 am Ort der Spannungsspitze auf. Eine merkliche Ver-

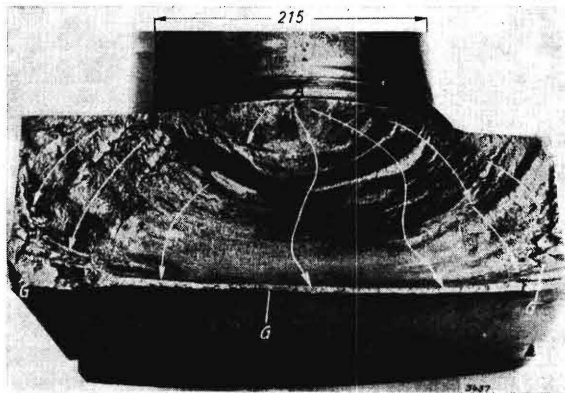


Bild 16. Dauerschwingbruch an einer biegebeanspruchten Kurbelkröpfung nach Ehart und Kühnelt [43].

kleinerung der Spannungsspitze erzielte man durch eine Formgebung mit dem Ziel, einerseits die äußeren Teile von Wange und Zapfen stärker an der Kraftübertragung zu beteiligen, andererseits die inneren Teile zu entlasten. Ersteres erreichte man durch eine Wange, die wesentlich breiter war als der Zapfen, und durch Ausbohren des Zapfens, am besten in abgesetzter Ausführung. Letzteres geschah durch Einfräsungen oder Ausnehmungen an der Wageninnenseite. Diese konstruktive Entwicklung der Kurbelwelle ist in Bild 17 dargestellt, die Reihenfolge im Bild entspricht der Reihenfolge in der Güte der Formgebung, gekennzeichnet durch die Höhe der Spannungsspitzen. Auch die „gebauten“ Kurbelwellen und die Kurbelwellen mit Hirth-Verzahnung weisen ein günstiges Spannungsfeld auf. Besonders vielfältige Gestaltungsmöglichkeiten bietet die aus Gußeisen mit Kugelgraphit gegossene Kurbelwelle, die sich in den letzten Jahren neben der geschmiedeten Kurbelwelle durchgesetzt hat.

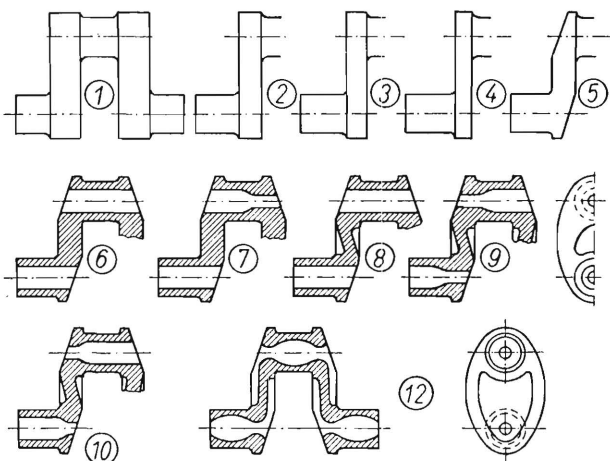


Bild 17. Entwicklung der Form von Kurbelkröpfungen nach Färber [44].

Die Belastbarkeitserhöhung durch bessere Formgebung gegenüber der einfachen Bauform beträgt bei geschmiedeten und gegossenen Kurbelwellen rd. 300%.

Durch die Verkleinerung der Spannungsspitzen und damit die gleichmäßigere Beanspruchung des gesamten Baukörpers war der Weg frei für die Verwendung der hochfesten Stähle mit den ungünstigeren Kerbwirkungszahlen. Lange Zeit war man der Meinung, es gäbe unabhängig vom Werkstoff eine bestimmte Belastbarkeitsgrenze für Kurbelwellen, weil man die stärkere Wirkung der Spannungsspitzen bei hochfesten Stählen noch nicht kannte. Eine werkstofftechnische Maßnahme zur Steigerung der Festigkeit war auch das Schmieden der Kurbelwellenrohlinge im Gesenk und der dadurch erzielte günstige Faserverlauf. Die Belastbarkeitserhöhung betrug dabei rd. 50%.

Weitere Maßnahmen zur Verbesserung der Schwingfestigkeit bestanden darin, die Randschicht des Bauteiles zu verbessern. Die Übergänge wurden poliert und erhielten durch Rollen, Hämmern oder Kugelstrahlen eine günstige Eigenschicht. Das Induktionshärten, das Flammenhärten, das Salzbadnitrieren, das Gasnitrieren wirkten im gleichen Sinne. Die Belastbarkeitserhöhung betrug dabei rd. 50%.

Natürlich kam auch die Verkleinerung und günstige Anbringung der äußeren Kräfte und Massenkräfte der Belastbarkeit der Kurbelwelle zugute. Durch die hohle Ausführung der Zapfen wurden die Fliehkräfte verkleinert, was sich besonders vorteilhaft bei Fahrzeugmotoren auswirkte, wo aus Gründen des Leichtbaus auf Gegengewichte teilweise oder ganz verzichtet wird. Die günstige Anordnung von Zylindern und Kurbelversetzungen und die Verwendung von Schwingungsdämpfern kamen ebenfalls der Belastbarkeit zugute.

Aus der dargestellten Entwicklung der Kurbelwelle geht die überragende Bedeutung der Formgebung für die Belastbarkeitserhöhung klar hervor. Auch eine alte Dauerbruchstatistik nach Bild 18 für Bauteile des klassischen Maschinenbaus führt einen großen Teil der Brüche auf fehlerhafte Formgebung zurück. Falscher oder fehlerhafter Werkstoff wird demgegenüber nur

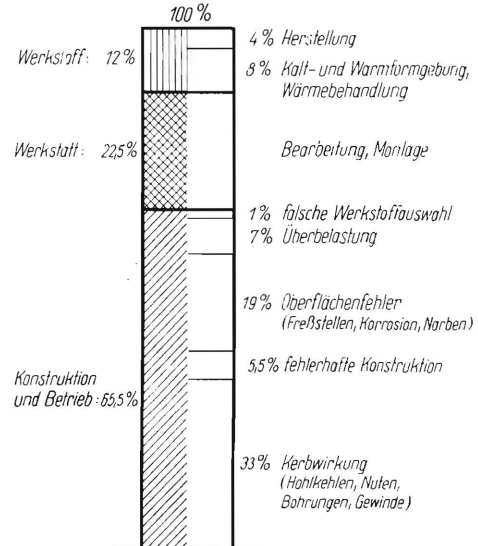


Bild 18. Dauerschwingbruchstatistik für Bauteile des klassischen Maschinenbaus nach Hempel [45]. Statistische Auswertung der Ursachen von 465 Brüchen nach dem Schrifttum.

selten als Bruchursache genannt, was auf einen hohen Entwicklungsstand zumal der metallischen Werkstoffe hinweist.

Die heutige weite Verbreitung der Schweißtechnik als Herstellungsverfahren legt es nahe, ausgehend von den dargestellten Verhältnissen bei der Kurbelwelle die Entwicklungsmöglichkeiten dauerschwingbeanspruchter Schweißverbindungen abzuschätzen. Das Lastspannungsfeld einer Schweißverbindung weist häufig ebenso ausgeprägte Spannungsspitzen auf wie das Lastspannungsfeld einer Kurbelwelle, sowohl der Grobbau als auch der Feinbau der Schweißverbindungen gibt Anlaß zu einer großen Zahl derartiger Spitzen. Also sind bei solchen Schweiß-



verbindungen Belastbarkeitserhöhungen durch bessere Formgebung in gleicher Größenordnung wie bei der Kurbelwelle zu erwarten. Der Verwendung hochfester und kerbempfindlicher Stähle sind demgegenüber bei Schweißverbindungen, die an Nahtansatz und Nahtwurzel hohe Spannungsspitzen aufweisen, enge Grenzen gesetzt. Auch die Verbesserung der Bauteiloberfläche, speziell der Nahtoberfläche, durch Überschleifen ist in ihrer belastbarkeitserhöhenden Wirkung beschränkt. Daraus geht hervor, daß auch bei Schweißverbindungen die größten Belastbarkeitserhöhungen durch bessere Formgebung zu erreichen sind.

Immer dann, wenn dauerschwingbeanspruchte Bauteile konstruktiv gut entwickelt sind, wird man versuchen, durch Aufnahme von Lastkollektiven in Verbindung mit zugehörigen Wöhlerkurven dem Konstrukteur Unterlagen für eine optimale Dimensionierung der Bauteile zu geben. Während jedoch die Spannungsfelder Hinweise für die richtige Formgebung geben, können aus den Lastkollektiven im allgemeinen keine konstruktiven Maßnahmen abgeleitet werden.

### Schrifttum

- [1] Lehr, E.: Spannungsverteilung in Konstruktionselementen. Berlin: VDI-Verlag 1934.
- [2] Timoshenko, S. u. J. N. Goodier: Theory of elasticity. 2. Aufl. New York/Toronto/London: McGraw Hill Book Comp. Inc. 1951.
- [3] Föppl, L. u. G. Sonntag: Tafeln und Tabellen zur Festigkeitslehre. München: Oldenbourg-Verlag 1951.
- [4] Biezeno, C. B. u. R. Grammel: Technische Dynamik. Bd. 1 u. 2, 2. Aufl. Berlin/Göttingen/Heidelberg: Springer-Verlag 1953.
- [5] Sawin, G. N.: Spannungserhöhung am Rande von Löchern. Berlin: VEB Verlag Technik 1956.
- [6] Wlassow, W. S.: Allgemeine Schalentheorie und ihre Anwendung in der Technik. Berlin: Akademie-Verlag 1958.
- [7] Neuber, H.: Kerbspannungslehre. 2. Aufl. Berlin/Göttingen/Heidelberg: Springer-Verlag 1958.
- [8] Girkmann, K.: Flächentragwerke. 5. Aufl. Wien: Springer-Verlag 1959.
- [9] Kloth, W.: Atlas der Spannungsfelder in technischen Bauteilen. Düsseldorf: Stahl Eisen-Verlag 1961.
- [10] Kolsky, H.: Stress waves in solids. Oxford: Clarendon Press 1953.
- [11] Miklowitz, J.: Recent developments in elastic wave propagation. Applied Mechanics Reviews **13** (1960) Nr. 12, S. 865/78.
- [12] Prager, W. u. P. G. Hodge: Theorie ideal plastischer Körper. Wien: Springer-Verlag 1954.
- [13] Prager, W.: Probleme der Plastizitätstheorie. Basel u. Stuttgart: Birkhäuser-Verlag 1955.
- [14] Hill, R.: The mathematical theory of plasticity. Oxford: Clarendon Press 1956.
- [15] Radaj, D.: Stand des Wissens über die Spannungsfelder bei zeitlich veränderlicher Belastung und plastischem Werkstoffverhalten. Materialprüfung **6** (1964) Nr. 6, S. 205/10.
- [16] Schmid, E. u. W. Boas: Kristallplastizität. Berlin 1935.
- [17] Kochendörfer, A.: Plastische Eigenschaften von Metallen und metallischen Werkstoffen. Reine und angewandte Metallkunde in Einzeldarstellungen. Hrsg. von W. Köster, Bd. 7, Berlin 1941.
- [18] Cottrell, A. H.: Dislocations and plastic flow in crystals. Oxford 1953.
- [19] Read, W. T.: Dislocations in crystals. New York/Toronto/London: McGraw Hill. Book Comp. Inc. 1953.
- [20] Kochendörfer, A.: Physikalische Grundlagen der Formänderungsfestigkeit der Metalle. Stahl Eisen-Sonderberichte H. 5. Düsseldorf: Stahl Eisen-Verlag 1963.
- [21] Valluri, S. R.: A unified engineering theory of high stress level fatigue. Aerospace Engng. **20** (1961) Nr. 10, S. 18/19, 68/69, 71/75 u. 77/89.
- [22] Hempel, M., A. Kochendörfer u. E. Hillnhagen: Einfluß der Kristallorientierung auf die Ausbildung von Gleitspuren an der Oberfläche biegewechselbeanspruchter  $\alpha$ -Eisen-Einkristallproben. Arch. Eisenhüttenwes. **28** (1957) H. 8, S. 433/44.
- [23] Hempel, M.: Gefügeänderungen und Vorgänge beim Dauerbruch metallischer Werkstoffe. Materialprüfung **3** (1961) Nr. 10, S. 365/76.
- [24] Kochendörfer, A.: Bedingungen für die Auslösung und das Auftreten des Spröd- und Verformungsbruches auf Grund der Eigenschaften der Versetzungen. Arch. Eisenhüttenwes. **25** (1954) H. 7/8, S. 351/72.
- [25] Wever, F., M. Hempel u. A. Schrader: Metallographische Untersuchungen über Verformungserscheinungen an der Oberfläche biegewechselbeanspruchter Proben aus St 37. Arch. Eisenhüttenwes. **26** (1955) H. 12, S. 739/54.
- [26] Pohl, E. J.: Das Gesicht des Bruches metallischer Werkstoffe. Berlin/München: Allianz Versicherungen AG 1956.
- [27] Thum, A. u. W. Buchmann: Dauerfestigkeit und Konstruktion. H. 1 der Mitteilungen der Materialprüfungsanstalt an der TH Darmstadt. Berlin: VDI-Verlag 1932.
- [28] Oschatz, H.: Gesetzmäßigkeiten des Dauerbruches und Wege zur Steigerung der Dauerhaltbarkeit gekerbter Konstruktionen. Diss. TH Darmstadt 1932. H. 2 der Mitt. Materialprüfungsanstalt TH Darmstadt. Berlin: VDI-Verlag 1932.
- [29] Thum, A. u. K. Federn: Spannungszustand und Bruchausbildung. Berlin: Springer-Verlag 1939.
- [30] Arbeitsblätter Nr. 1 bis 5 des Fachausschusses für Maschinenelemente beim VDI (siehe auch Z. VDI (1933) Nr. 42, (1933) Nr. 50, (1934) Nr. 7, (1934) Nr. 12, (1934) Nr. 34).
- [31] Roš, M. u. A. Eichinger: Die Bruchgefahr fester Körper bei wiederholter Beanspruchung. — Ermüdung. EMPA-Bericht Nr. 173, Zürich 1950.
- [32] Rühl, K. H.: Die Tragfähigkeit metallischer Baukörper, Berlin 1952.
- [33] DIN 50100, Dauerschwingversuch, Jan. 1953. Beuth-Vertrieb G.m.b.H., Berlin W 15 und Köln.
- [34] Stüssi, F.: Die Theorie der Dauerfestigkeit und die Versuche von August Wöhler. Zürich: Verlag V. S. B. 1955.
- [35] Neumann, A.: Bringt St 52 für Schweißkonstruktionen Vorteile? ZIS Mitt. **2** (1960) H. 9, S. 565/81.
- [36] Harris, W. J.: Metallic fatigue. London/New York/Paris/Oxford: Pergamon Press 1961.
- [37] Weibull, W.: Fatigue testing and analysis of results. London/New York/Paris/Oxford: Pergamon Press 1961.
- [38] Hempel, M.: Das Dauerschwingverhalten der Werkstoffe. Z. VDI **104** (1962) H. 27, S. 1362/77.
- [39] Kowalewski, J.: Über die Beziehungen zwischen der Lebensdauer von Bauteilen bei unregelmäßig schwankenden und bei geordneten Belastungsfolgen. DVL-Bericht Nr. 249. Köln: Ver. Universitäts- und Fachbuchhandlungen 1963.
- [40] Richtlinien für die Festigkeitsberechnung von geschweißten Verbindungen im Maschinenbau, Fahrzeugbau — Straße, Landmaschinen- und Traktorenbau. R 01—62, Blatt 1 bis 4, Zentralinstitut für Schweißtechnik, Halle.
- [41] Erker, A.: Sicherheit und Bruchwahrscheinlichkeit. MAN-Forschungsheft (1958) Nr. 8, S. 1/14.
- [42] Harris, W. J.: Cycling stressing frequency effect on fatigue strength. Aircraft Engng. **31** (1959) Nr. 370, S. 352/57.
- [43] Ehrh, M. u. G. Kühnelt: Das Gesicht des Dauerbruches. Berlin 1938.
- [44] Färber, M.: Der Einfluß der Form auf die Spannungsverteilung in Kurbelementen. Diss. TH Darmstadt 1950.
- [45] Hempel, M.: Dauerfestigkeitsprüfungen und Werkstoffverhalten bei der Schwingbeanspruchung. Z. VDI **94** (1952) H. 25, S. 809/18, S. 882/87.
- [46] Oppitz, A.: Kurbelwellen-Brüche, Ursachen und Folgerungen. Jahrbuch der Schiffbautechnischen Gesellschaft **49** (1955) S. 353/388.
- [47] Amedick, E.: Einfluß der Form auf die Dauerhaltbarkeit von Schmiedestücken, insbesondere Kurbelwellen. Technische Blätter Wuppermann, H. 3, 1958.
- [48] Radaj, D.: Über die Bedeutung der Spannungsermittlung für die Entwicklung dauerschwingfester Schweißkonstruktionen. Schweißen und Schneiden **16** (1964) H. 2, S. 51/54.