

Welche Veränderungen erleiden die mechanischen Eigenschaften durch Ermüdung?

Von J. Czochralski und E. Henkel, Frankfurt a. M. (Vorgetragen von J. Czochralski)

(Hierzu Bildtafel 1)

Nachweis von Eigenschaftsänderungen beim Ermüdungsversuch, insbesondere bei den weichgeglühten Metallen. Deutung der Ermüdungsvorgänge durch Flächen „äquiminimalen Widerstandes“, deren experimenteller Nachweis angestrebt wurde. Schädigung der Ermüdungsfestigkeit durch unzuverlässige Bearbeitungsarten (falsches Schmirgeln). Bekämpfung der Ermüdungsgefahr.

Plastische Formänderungen bilden die Voraussetzung eines jedweden Dauer- oder Ermüdungsbruches, vorausgesetzt, daß nicht durch Vorhandensein oder Auslösung innerer Spannungen ein Zusammentreffen beider Zerstörungsvorgänge herbeigeführt wird. Sind diese Annahmen richtig, so müßten an dauerermüdeten Konstruktionsteilen Eigenschaftsänderungen (von dem Vorhandensein innerer Spannungen abgesehen, vgl. Martens-Heyn, Materialkunde 1912 S. 280) nachweisbar sein. Als einwandfrei dürften die Feststellungen nur bei einer zahlenmäßigen Erfassung beider Einflüsse gelten. Nun ist aber einerseits die zahlenmäßige Festlegung der inneren Spannungen mit sehr großen Schwierigkeiten verknüpft und vielfach vielleicht überhaupt nicht mehr durchführbar, andererseits konnten aber auch Materialveränderungen zuverlässig und eindeutig bei dauerermüdeten Materialien bislang zahlenmäßig nicht nachgewiesen werden.

Die neue Schwingungsbiegemaschine, Abb. 1, durch die eine gleichmäßige Stabbeanspruchung ermöglicht

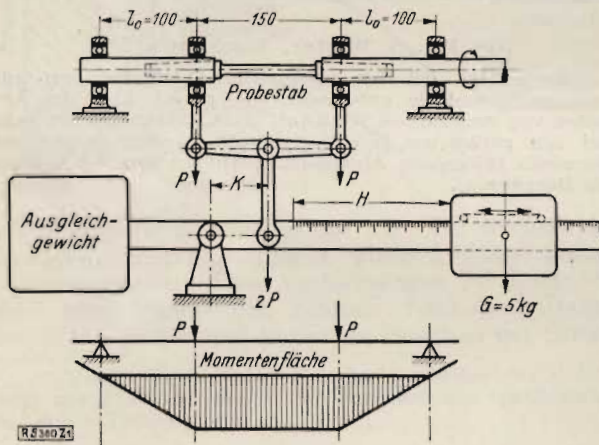


Abb. 1. Schema des Lastangriffs bei der dynamischen Biegemaschine (Schenk)

wird, schien daher besonders geeignet, um diesen Fragen erneut nachzugehen, nachdem wiederholte Versuche des Verfassers, bei denen Dauerschlagmaschinen verwendet wurden, keinerlei Bestätigung obiger Annahmen erbracht hatten. Das negative Ergebnis erscheint auch ziemlich verständlich, wenn man berücksichtigt, daß bei diesem Verfahren das Moment nur in einer Querschnittschicht einen Höchstwert erreicht. Bei dem neuen Verfahren (früher schon von Wöhler verwendet) ist das Beanspruchungsmoment auf eine große Fläche gleichmäßig verteilt. Etwaige Veränderungen der Eigenschaften müßten sich also dem ganzen Stabquerschnitt mitteilen und somit auch mechanisch gut erfaßbar sein. Da die plastischen Formänderungen trotz alledem hierbei nur einen ganz geringfügigen Betrag annehmen

dürften, so erschien es von vornherein ratsam, die mechanisch-physikalischen Konstanten besonders ins Auge zu fassen, die auf derartig geringfügige Beanspruchungen am empfindlichsten ansprechen, und dies sind in erster Linie die Elastizitäts- und die Streckgrenze. Aber auch die Verfolgung etwaiger Veränderungen der Festigkeit und Dehnung schien von besonderer Wichtigkeit.

Die Versuchsausführung und Belastungsfolge geht aus nachstehender Gegenüberstellung (Zahlentafel 1) hervor. Untersucht wurden Aluminium,

Zahlentafel 1. Versuchsausführung und Belastungsfolge bei den Versuchen mit der Schwingungsbiegemaschine

Material	weich	hart	Schnellversuche
	Erhöhung der Spannung		
Al (99,5%)	1 kg/mm ² je 2 min	1 kg/mm ² je 2 min	0 bis 10 kg/mm ² in 2 min
Cu (99,95%)		2 kg/mm ² je 2 min	0 bis 25 kg/mm ² in 5 min
Stahl (0,3% C)	2 kg/mm ² je 2 min		

Kupfer und Stahl, und zwar sowohl in weichgeglühtem als auch in stark verfestigtem Zustand. Die Umdrehungszahl war bei allen Versuchen einheitlich $n = 2500/\text{min}$. Bei Aluminium wurde die Spannung alle 2 min um 1 kg/mm² erhöht, ebenso bei weichem Kupfer; bei hartem Kupfer und weichem und hartem Stahl um je 2 kg/mm² in 2 min. Bei den Schnellversuchen wurde bei Aluminium die Spannung von 0 bis 10 kg/mm² in 2 min, bei Kupfer die Spannung von 0 bis 25 kg/mm² in 5 min erhöht.

Über die Durchbiegung der Stäbe beim Schnellversuch geben die Schaubilder Abb. 2, 3 und 4 Aufschluß. Die ausgezogenen Kurven bringen die Gesamtdurchbiegung zum Ausdruck, und zwar für die ge- glühten und verfestigten Stäbe, während die gestrichelten Kurven der Meßlänge $l = 75 \text{ mm}$ entsprechen; sie beschränken sich nur auf die weich ge- glühten Proben. Die wirkliche Durchbiegung der Stäbe beträgt also nur Bruchteile der Gesamtdurchbiegung des Systems. Bemerkenswert ist das kenn- zeichnende starke Nachfließen des Materials bei ge- glühtem Stahl (Abb. 4).

Welche Veränderungen nun die Eigenschaften bei dieser Art von Dauerbeanspruchung erleiden, zeigen für das Aluminium die Schaubilder Abb. 5 und 6. Die Veränderung der Eigenschaften des weichen Metalles verläuft bis auf die Bruchfestigkeit (σ_B) fast proportional dem Grade der Wechselbeanspruchung. Bereits bei einer Spannung von 1 kg/mm² und einem Spannungswechsel von 0,1 Million kann ein deutlicher Einfluß auf alle untersuchten Konstanten mit Ausnahme von σ_B festgestellt werden. Bei einer Spannung von 5 kg/mm² konnte bereits ein

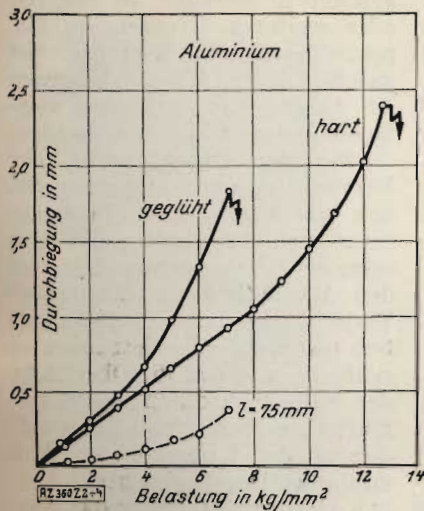


Abb. 2. Durchbiegung von Aluminium (scheinbar und effektiv)

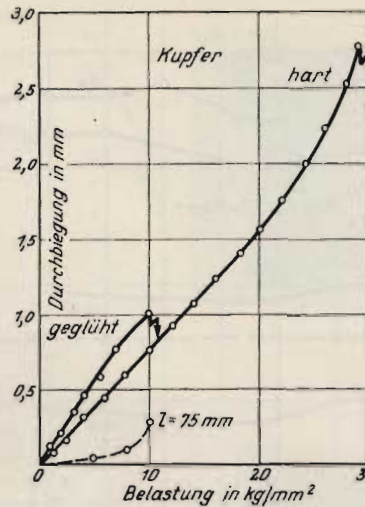


Abb. 3. Durchbiegung von Kupfer (scheinbar und effektiv)

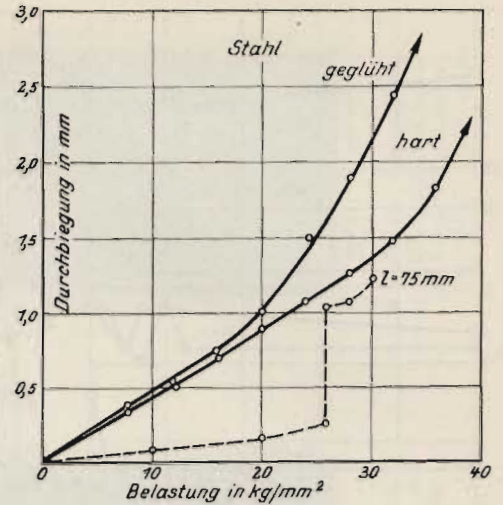


Abb. 4. Durchbiegung von Stahl (scheinbar und effektiv)

Anstieg dieser Konstanten auf den doppelten Betrag ermittelt werden. Die Wechselzahlen konnten bei diesen Spannungen nur selten über einige Hunderttausende ohne Bruch gesteigert werden. Die Dehnung zeigt einen geringfügigen, aber deutlichen Abfall, und zwar schon bei den niedrigsten der angewendeten Spannungsstufen. Ein Einfluß auf die Zugfestigkeit war nicht zu ermitteln. Bei hartem Aluminium konnte ein ähnlicher Einfluß auf die Eigenschaften nicht festgestellt werden, zumal die Werte ziemlich erhebliche Streuungen zeigen.

Noch eindeutiger zeigt sich der Einfluß dieser Art der Dauerbeanspruchung beim Kupfer, wie dies die Schaubilder Abb. 7 und 8 dartun. Die 0,001-, 0,02- und 0,2-Grenze steigen bei den weich geglühten Stäben auf mehr als das Doppelte an; die Dehnung (δ) zeigt einen deutlichen Abfall, und auch die Festigkeit (σ_B) zeigt entgegen dem beim Aluminium erhaltenen Ergebnis einen geringfügigen, aber ebenso deutlichen und regelmäßigen Anstieg. Selbst bei dem hartgezogenen Material kann im großen und ganzen eine vielleicht gleich deutbare Tendenz eben noch festgestellt werden.

Beim Stahl ist der Nachweis von Eigenschaftsänderungen unter den gleichen Bedingungen nicht so eindeutig wie bei Aluminium und Kupfer. Dies dürfte offenbar mit der hohen Elastizitätsgrenze des Materials in Zusammenhang stehen. Erst bei verhältnismäßig hohen Spannungen ($> 16 \text{ kg/mm}^2$) scheint

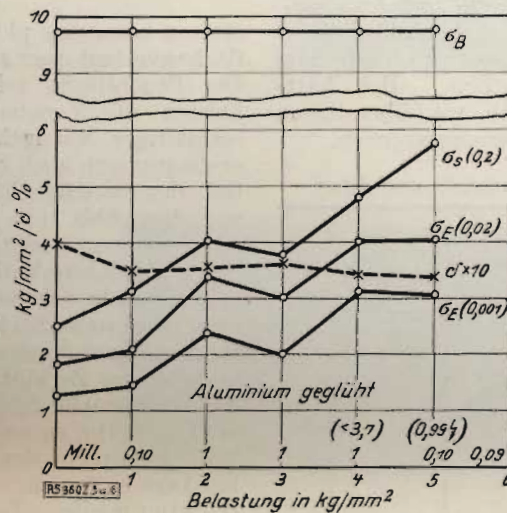


Abb. 5 und 6. Einfluß der Dauerbiegebeanspruchung auf die mechanischen Eigenschaften von geglühtem und hartem Aluminium

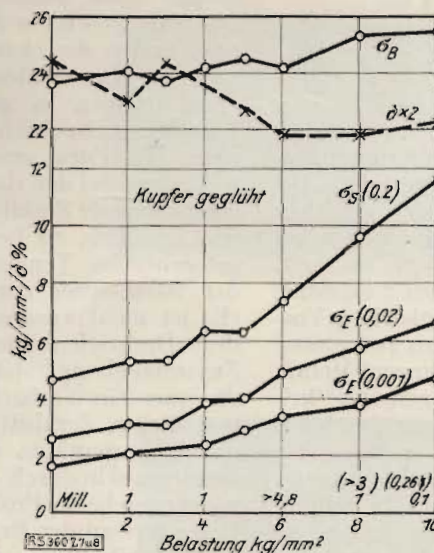
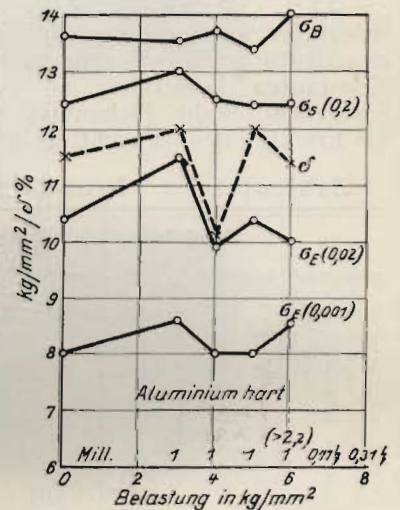
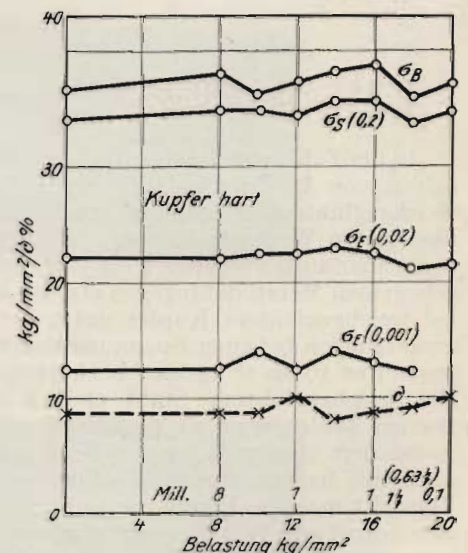


Abb. 7 und 8. Einfluß der Dauerbiegebeanspruchung auf die mechanischen Eigenschaften von geglühtem und hartem Kupfer



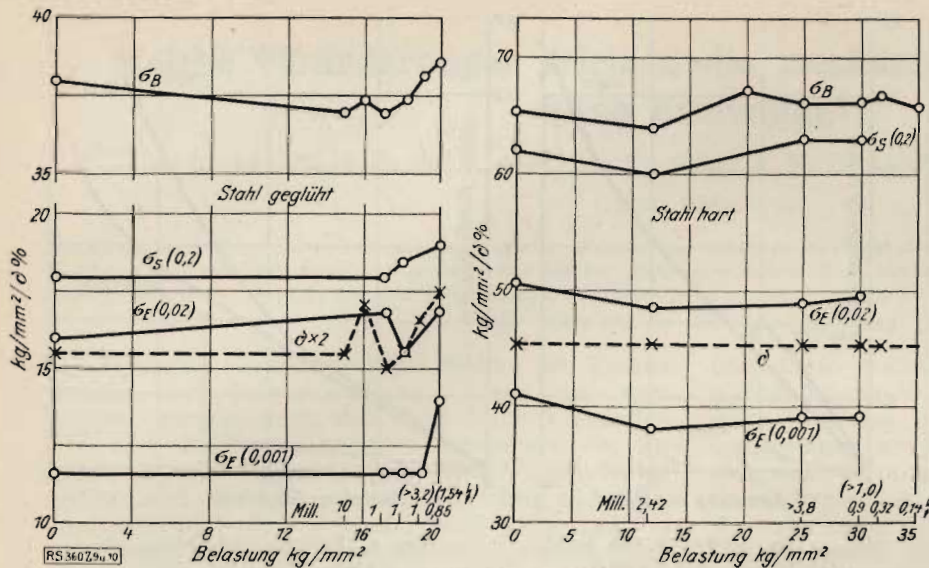


Abb. 9 und 10. Einfluß der Dauerbiegebeanspruchung auf die mechanischen Eigenschaften von geglühtem und hartem Stahl

sich beim weichgeglühten Stahl (Schaubild Abb. 9) eine deutliche Verschiebung in den physikalischen Konstanten bemerkbar zu machen. Bei hartgezogenem Stahl (Schaubild Abb. 10) übersteigen die Effekte offenbar nicht die Streuungsgrenzen.

Zahlentafel 2. Kritische Ermüdungszahlen

Biege- spannung kg/mm²	Aluminium		Kupfer		Stahl	
	gegült	hart gezogen	gegült	hart gezogen	gegült	hart gezogen
	Lastwechsel in Mill. (9,5 mm Ø)					
1	> 5,69					
4	> 3,66					
5	{ 0,99* 1,32* }	> 3,0				
6	0,09*	> 2,2	> 4,78			
7		0,77*	> 3,0			
8		0,77*	> 3,03			
10		0,31*	> 0,26*			
12			> 3,1			
16			> 1,0			
18			1,0*			
19			0,63*	{ 1,0 1,54		
20						
25					> 3,8	
30					> 1,02	
32					0,32*	
35					0,14*	

* Bruch

In der Zahlentafel 2 sind die kritischen Ermüdungszahlen von Al, Cu und Stahl gegenübergestellt. Bei weichgeglühtem Aluminium trat bei der üblichen niedrigsten Wechselzahl von 1 Million der Bruch bei einer Spannung von etwa 4 bis 5 kg/mm² ein, bei hartgezogenem Metall dahingegen erst bei 6 bis 7 kg/mm²; bei weichgeglühtem Kupfer unter den gleichen Voraussetzungen bei einer Spannung von 8 bis 10 kg/mm² gegenüber 16 bis 18 kg/mm² bei hartgezogenem Metall. Bei weichgeglühtem Stahl endlich lagen die kritischen Zahlen über 20 kg/mm² Spannung, bei hartgezogenem über 30 kg/mm². Die Metalle erwiesen sich also im hartgezogenen Zustand ermüdungsfester. Versucht man die Ergebnisse in irgendeine Beziehung zur ursprünglichen Elastizitätsgrenze zu setzen, so läßt sich eine gewisse, wenn auch nicht sehr ausgesprochene Beziehung feststellen. Im großen und ganzen streut die Ermüdungsfestigkeit bei den hart-

gezogenen Metallen in engeren oder weiteren Grenzen im Bereiche der Elastizitätsgrenze. Bei weichem Metall kann dahingegen ein Anstieg bis zum etwa vierfachen Betrag konstatiert werden.

Bei der Durchführung der Versuche konnte nun gelegentlich die merkwürdige Beobachtung gemacht werden, daß einzelne der beanspruchten Stäbe an den Mantelflächen scharfrissige Verletzungen zeigten. Gelegentlich traten diese Verletzungen so zahlreich auf, daß die Oberfläche der Stäbe fast durchgehend zerklüftet erschien. Zunächst wurde dies an den hartgezogenen Aluminiumstäben beobachtet. Abb. 11a (Bildtafel 1) zeigt das Aussehen eines solchen in Aufsicht. Die Linien und Risse verlaufen meist im Winkel von 45° zur Stabachse oder nähern sich weitgehend einem solchen. Des

öfteren kann eine plötzliche Ablenkung in dem Spaltflächenverlauf quer zur Stabachse beobachtet werden. Die Bruchfläche zeigt meist typische Dauerbruchformen mit Zonenausgestaltung (Abb. 11b). Beim sorgfältigen Nachgehen ließen sich die Zerklüftungserscheinungen auch bei den hartgezogenen und ebenso bei den weichgeglühten Kupferstäben nachweisen, wie dies Abb. 12a und 12b veranschaulicht. Die scharfrissigen Verletzungen und Spaltflächen zeigen einen ähnlichen Verlauf.

Es wurde nun versucht, den Zerklüftungserscheinungen systematisch nachzugehen. Aus der scharfrissigen, geradlinigen, doppelschraubenartigen Ausbildung der Zerklüftung mußte geschlossen werden, daß die Ursache der Erscheinung in der Bearbeitungsart der Stäbe zu suchen sei. In erster Linie war das Nachschmirlen der Stäbe als Quelle der Anomalie ins Auge zu fassen. In der Tat konnte diese Annahme bestätigt werden. Zu diesem Zwecke wurde eine Reihe von Versuchsstäben vor der Untersuchung besonders stark in der Weise nachgeschmirlt, daß die Schleifriefen gegenläufig-doppelschraubenartig verliefen, und darauf einer Dauerbiegebeanspruchung unterzogen. Das Ergebnis ist in Abb. 13 veranschaulicht. Wiederum können die charakteristischen, in einem Winkel von 45° zur Stabachse verlaufenden scharfrissigen Zerklüftungen in großer Zahl beobachtet werden. Erfolgte das Nachschmirlen derart, daß die Schmirliefen die Form einer einfachen Schraube hatten, so können bei den dauerermüdeten Proben auch übereinstimmende Zerklüftungsformen beobachtet werden, wie aus Abb. 14 hervorgeht. Auch hier konnte die gelegentliche Tendenz zum plötzlichen Ausweichen der Risse quer zur Stabachse festgestellt werden. (Es ist nicht ausgeschlossen, daß diese Tendenz mit der Drehriefenbildung des Schnittwerkzeuges in Zusammenhang steht.) Folgerichtig müßten nun die quer zur Stabachse geschmirlten Proben keine von diesen Zerklüftungsformen zeigen, sondern sich durch ausgeprägte Querrissigkeit auszeichnen. Dies konnte auch durch den Versuch an der in Abb. 15 wiedergegebenen Probe beweiskräftig bestätigt werden. Besonders an der Bruchstelle überlagern sich mehrere solcher teilweise getrennter Querscheiben, was durch die aufgeworfene Deformationszone nur um so besser zum Vorschein kommt.



Abb. 11a. Al kalt gezogen (Risse links- und rechtsgängig).
3 × vergr.



Abb. 11b. Bruchfläche eines
hartgezogenen Al-Stabes. Typi-
sche Dauerbruchform.
3 × vergr.



Abb. 12a. Cu kalt gezogen (Risse links- und rechtsgängig).
3 × vergr.



Abb. 12b. Gesamtansicht,
Cu weich gegläht
(Risse). 0,7 nat. Größe

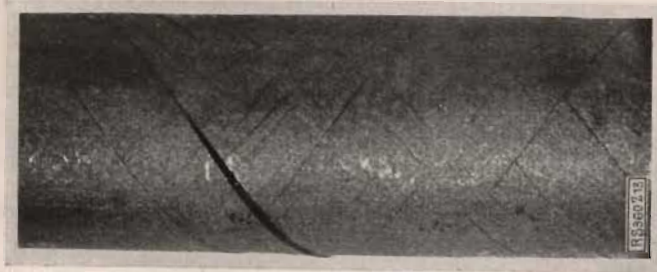


Abb. 13. Cu gegläht,
Schleifriefen gegenläufig-
doppelschraubenartig
(Risse links- und rechts-
gängig). 3 × vergr.



Abb. 14. Cu gegläht,
Schleifriefen in Form
einer einfachen Schraube
(Risse rechtsgängig).
3 × vergr.

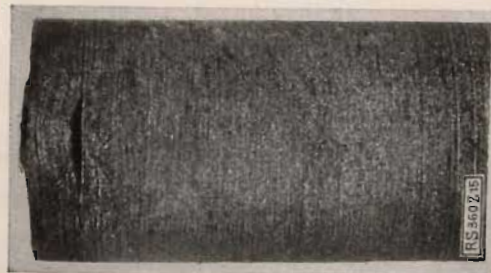


Abb. 15. Cu gegläht,
quer zur Stabachse ge-
schmirgelt (Querrissig).
4 × vergr.

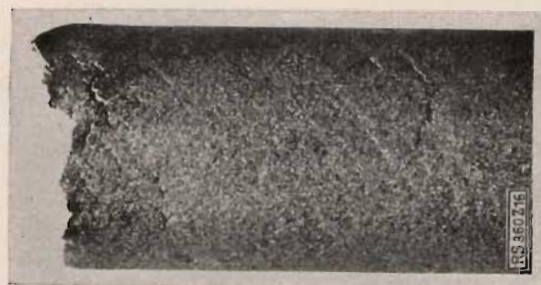


Abb. 16. Cu gegläht,
parallel zur Stabachse
geschmirgelt (Risse un-
regelmäßig). 3 × vergr.

Abb. 11a bis 16. Zerkütlungsrisse an Dauerbiegeproben von Al und Cu

Es erschien nun naheliegend, daß durch ein Nachschmiegeln parallel zur Stabachse alle diese schädlichen Einflüsse restlos aufgehoben werden müßten. Weitere Versuche haben dies auch bestätigt. Von vornherein war es mehr oder weniger wahrscheinlich, daß bei den in der Längsachse nachgeschmiegelten Stäben keinerlei Anrisse mehr auftreten würden. Bei sorgfältiger Beobachtung können dennoch an diesen Stäben feine, wenn auch ziemlich verborgene Anrisse festgestellt werden, Abb. 16, nur zeigen sie keineswegs einen Verlauf, wie er an den oben beschriebenen Proben beobachtet werden konnte. Charakteristisch ist für sie die Zickzackform, ihre geringfügige Ausdehnung und ihre fast gesetzlose Anordnung. Offenbar hängt diese Erscheinung nicht wie die vorbeschriebenen Zerklüftungsrisse mit zufälligen Bearbeitungseinflüssen zusammen, sondern vielmehr mit bestimmten charakteristischen Materialeigenschaften. Nun stimmt diese Deutung der Erscheinungen ganz gut mit einem von dem Verfasser bereits vor diesen Feststellungen aufgestellten Erklärungsversuch der Ermüdungsvorgänge überein, der die Annahme einer Wechselbeziehung zwischen dem Gleitwiderstand und dem Reißwiderstand zum Ausgang hat, wie diese Beziehung im übrigen wohl auch von Ludwik vertreten wird. Unter Zugrundelegung eines bestimmten Mechanismus der Verformung (der durch die vorliegenden Versuche weitgehend gestützt wird) läßt sich hieraus eine vorerst vielleicht befriedigende Theorie des Dauerbruches ableiten, nämlich unter der Annahme, daß die Spannungen in den einzelnen Teilen des Querschnittes sich sehr verschieden auswirken können. Dabei kann der Spannungsinhalt für die Einheit des Volumens der gleiche sein. Dies hängt damit zusammen, daß ein vielkristallines Gebilde sich eben nie ganz homogen verhalten kann. Es werden sich offenbar fächerartig angeordnete Flächen geringsten Widerstandes in seinem Rauminhalt vorfinden. Dies erscheint von vornherein theoretisch bedeutungsvoll und gewinnt durch die vorliegenden Versuchsergebnisse an Wahrscheinlichkeit. Bei jeder Beanspruchungsart werden sich nun im Querschnitt Flächen, wie der Verfasser sie bezeichnet, „äquiminimaler Festigkeit“ vorfinden. Auf diesen „Äquiminimalen“ verminderten Widerstandes wird sich in allererster Linie das Dauerwerk der Zerstörung abspielen. Überschreitet die Beanspruchung in den Äquiminimalen eine gewisse Grenze, so führt dies zur Ausbildung einer örtlichen Materialverschiebung und letzten Endes zur Materialtrennung. Die Vorbedingungen für die Ausbildung dieser Flächen sind durch die Zufälligkeit der kristallographischen Orientierung gegeben. Je geringer die Bevorzugung in der Orientierung ist, als um so dauerfester dürfte wohl ein Material anzusprechen sein. Die Flächen äquiminimaler Festigkeit brauchen keineswegs eine allzu große Ausdehnung zu haben, um sich in ihren schädlichen Einflüssen bemerkbar zu machen. Vielfach wird es schon genügen, wenn sie sich nur auf einen Bruchteil des Querschnittes erstrecken. Die Äquiminimalen werden in den meisten Fällen von einer ebenen Fläche abweichen. Ist einmal in einer solchen Fläche die Beanspruchung so weit vorgeschritten, daß der Gleitwiderstand im Verhältnis zum Reißwiderstand zu groß geworden ist, so werden sie im Sinne Ludwiks zu einer Materialtrennung führen. Von diesen Stellen aus wird sich der Bruch ausbreiten, der alsdann der durch die Art der Beanspruchung gegebenen Spannungsgeometrie folgen mag. Betrachtet man nun einen der Dauerbeanspruchung ausgesetzten Stab, so wird die Verfestigung besonders in

den Äquiminimalen einsetzen. Wird die Beanspruchung nicht bis zum Bruch getrieben, sondern der Stab dem üblichen Zerreißversuch unterworfen, so wird er in der Regel noch sehr erhebliche Dehnungswerte aufweisen, da jetzt infolge des Wechsels des Kraftangriffes das Fließen im wesentlichen an anderen Punkten des Querschnittes sich vollziehen wird. Die Äquiminimalen werden für jeden Kraftangriff eine ganz verschiedene Anordnung haben und je nachdem an ganz verschiedenen Punkten des Querschnittes sich entwickeln können. Nur bei gleichbleibendem Kraftangriff dürfte die Erschöpfung der Plastizität gesetzmäßig steigerungsfähig sein, d. h. daß beim Fortsetzen der Dauerprüfung der gleiche vorbeanspruchte Stab ohne merkliche Dehnung zerstört werden könnte. Die eigenartigen Zerklüftungserscheinungen bei der Dauerbeanspruchung scheinen die gegebene Erklärung weitgehend zu bestätigen. Alle diese Erscheinungen deuten darauf, den Ermüdungsvorgang als einen inhomogenen Prozeß anzusehen. Daher wird das Material auch nicht in der ganzen Masse durch Dauerermüdung verfestigt, sondern meist örtlich. Das Zerstörungswerk geht von diesen Stellen unter fortgesetzter Zermürbung aus, da diese gefährdeten Partien den erforderlichen Widerstand nicht mehr leisten können.

Stellt man nun die Frage: wie ist die Ermüdung zu erkennen? so kann darauf geantwortet werden: In einigen Fällen, wie bei den weichgeglühten Metallen, an den Eigenschaftsänderungen; in anderen Fällen, wie beim Stahl und den kaltgereckten Metallen, kann indes dieser Weg für die nachträgliche Feststellung der Ermüdbarkeit nicht eingeschlagen werden, da dem Verfahren die erforderliche Empfindlichkeit fehlt.

Eine ebenso wichtige Frage ist: Wie kann man die Ermüdungsmängel beheben? Es muß darauf hingearbeitet werden, daß die näher erläuterten Schwachstellen im Material nicht auftreten, d. h. der Werkstoff muß weitgehend quasiisotrop sein (Abwesenheit der Transkristallisation und der Grobkörnigkeit).

Und welches sind nun die Gesichtspunkte für die Materialwahl? Der Konstrukteur muß vorerst über die Größe und die Art der Beanspruchungen und insbesondere über die hierbei auftretenden Deformationsgrößen eindeutig unterrichtet sein, ebenso wie der Materialprüfungstechniker über die diesen Anforderungen entsprechende Standhaftigkeit der Werkstoffe. Bereits in der Einleitung wurde gesagt, daß bei Beanspruchungen, die mit Sicherheit unterhalb der Elastizitätsgrenze liegen, ein Material von geringerer innerer Zähigkeit und hoher Elastizitätsgrenze am Platze sei; treten aber weitgehende überelastische Beanspruchungen auf, so wird ein Material von größerer innerer Zähigkeit und niedriger Elastizitätsgrenze oft das Überlegenere sein. In dieser Hinsicht wird vielleicht sowohl der Konstrukteur als auch der Materialprüfungstechniker noch umzulernen haben. Bei dem zäheren Material kann noch über einen Teil des Arbeitsvermögens auch beim Überschreiten der Elastizitätsgrenze verfügt werden, ehe der Bruch auftritt. Bei Beanspruchungen im elastischen Bereich verliert diese Überlegung ihren Sinn. Aber das beste Material kann unter Umständen nichts nützen bei zufälligen Überbeanspruchungen, denen das Werkstück dimensional nicht gewachsen ist, oder bei plötzlichen Unregelmäßigkeiten im Arbeitsverlauf der Maschine, die vorübergehend allen Vorkehrungsmaßregeln entwachsen. Welche Wirkung unter Umständen auch kleine Ursachen haben können, konnte

besonders an den durch die Schmirgelung bedingten Zerklüftungsrissen eindrücklich gezeigt werden. Die Folgerungen, die sich für die Oberflächenbehandlung von besonders gefährdeten Werkstücken ergeben, dürften ohne jede weitere Erläuterung klar hervorgehen.

Die Stützpfeiler im Kampf gegen den Dauerbruch heißen: Kenntnis der Werkstoffeigenschaften, Kenntnis der Beanspruchungs- und Deformationsgrößen und Vermeidung von zufälligen oder fahrlässigen Materialüberbeanspruchungen. [RS 360]

Eingegangen 21. Januar 1928.

Meinungsaustausch

Geh.-Rat Mathesius, Berlin

Mich hat an dem Vortrag am meisten das Auftreten und der nähere Nachweis von besonders Schwachstellen interessiert. Meiner Ansicht nach gibt es heute noch kein metallurgisches Verfahren, das im Großbetriebe ausgeführt wird, mit dem wir imstande sind, ganz gleichmäßig zusammengesetzte Legierungen herzustellen.

Das Eisen müssen wir desoxydieren und mit irgendwelchen Legierungszusätzen härter machen. Alle verwickelten Operationen müssen in wenigen Minuten durchgeführt werden, und wir haben kein mechanisches Mittel, das imstande wäre, uns die gleichmäßige Durchmischung dieser schwerbeweglichen Flüssigkeit vom spez. Gewicht 7 zu ermöglichen. Darin liegt die Ursache begründet, weshalb bei allen Metallen, die in unseren großen Prozessen der Praxis hergestellt werden, bei sorgfältiger Untersuchung durch Schleifen, Ätzen usw. immer bedeutende Ungleichmäßigkeiten in der Zusammensetzung nachgewiesen werden können. Hier ist bei den jetzt aufgefundenen Schwachstellen meiner Ansicht nach der erstmalige Nachweis geglückt, daß tatsächlich diese Ungleichmäßigkeiten im Material vorhanden sind, die die verschiedene Widerstandsfähigkeit des Materials gegenüber den elastischen Einwirkungen hervorrufen. Beim Stahl gibt es einen einzigen einwandfreien Prozeß, nämlich den Tiegelstahlprozeß. Deshalb möchte ich empfehlen, alle Versuche mit Eisen zunächst auf Material zu erstrecken, das nachweislich lediglich im Tiegelstahlprozeß hergestellt worden ist. Dann wird man in der Lage sein, diese Ungleichmäßigkeiten einigermaßen zu vermeiden. Beim Kupfer wird man über ähnliche Erscheinungen genau unterrichtet sein. Ich denke z. B. an den Oxydulgehalt, der hier ganz ähnliche Ungleichmäßigkeiten hervorrufen muß wie beim Eisen.

Dr.-Ing. Lehr, Darmstadt

Von den Versuchsreihen, die ich auf der Schenckschen Dauerbiegemaschine ausgeführt habe, greife ich zwei heraus, die geeignet erscheinen, die von Hrn. Czochralski gegebene Theorie zu stützen. Bei der ersten Versuchsreihe handelt es sich um Elektronguß, bei der zweiten um geglühten Siemens-Martinstahl von etwa 60 kg/mm² Zugfestigkeit und etwa 42 kg/mm² Streckgrenze.

In beiden Fällen wurde festgestellt, daß die Dauerfestigkeit um wesentliche Beträge gehoben werden kann, wenn man den Prüfstab dynamischen Beanspruchungen aussetzt, die dicht unterhalb der Ermüdungsgrenze liegen, und die Beanspruchung schrittweise, etwa von 1 zu 1 kg/mm², steigert, wobei auf jeden Belastungspunkt eine Lastwechselzahl von etwa 10 Millionen aufgebracht wird.

So gelang es mir, bei Elektronguß, dessen Ermüdungsgrenze normalerweise bei 6 kg/mm² liegt, durch schrittweise Erhöhung der Schwingungsbeanspruchung die Dauerfestigkeit bis auf 9 kg/mm² zu heben. Die Versuche wurden so durchgeführt, daß beginnend bei 4 kg/mm² die Belastung von 1 zu 1 kg/mm² gestaffelt wurde, wobei auf jeden Belastungspunkt 10 bis 12 Millionen Lastwechsel aufgebracht wurden.

Der oben erwähnte Siemens-Martinstahl hat normal eine Dauerfestigkeit von 25 bis 26 kg/mm². Es gelang, durch Dauerversuche, die analog denen mit Elektronguß durchgeführt wurden, die Dauerfestigkeit bis auf 31 kg/mm² zu heben.

Eine einwandfreie Erklärung des eigenartigen Verhaltens kann ich leider heute noch nicht geben, jedoch sind metallographische Untersuchungen hierüber im Gange.

Zweifellos tritt eine Verfestigung irgendwelcher Art auf. Eine Verfestigung durch Blockieren der Gleitflächen, wie sie beim Kaltrecken entsteht, kommt jedoch nicht in Frage, da die plastischen Verformungen des Materialgefüges um gleiche Beträge vor- und rückläufig verlaufen. Vorläufig finde ich für das eigenartige Verhalten, das man in einem anschaulichen Vergleich mit „Hochtrainieren“ bezeichnen kann, nur zwei Erklärungsmöglichkeiten. Entweder lagert sich das Kristallgefüge in eine widerstandsfähigere Form irgendwie um oder es verschwinden schwache Stellen im Gefügebau.

Die letztere Annahme dürfte die größere Wahrscheinlichkeit für sich haben und deckt sich im wesentlichen mit den von Hrn. Czochralski vorgetragenen Anschauungen.

Jedenfalls ist die beobachtete Erscheinung für den praktischen Maschinenbau von größter Bedeutung. Sie besagt,

daß Werkstoffe, die imstande sind, unter Wechselbeanspruchung ihre Dauerfestigkeit zu heben, während des Betriebes immer widerstandsfähiger werden, so daß die Bruchgefahr immer mehr sinkt. Allerdings zeigen nur verhältnismäßig wenige Werkstoffe dieses wertvolle Verhalten.

Prof. Nadai, Göttingen

Auf der Tagung des Schwingungsausschusses beim VDI, die vor etwa 4 Wochen in Braunschweig stattfand, hat Hr. Prof. Smekal sehr ausdrücklich auf die Unvollkommenheiten hingewiesen, die sogar der einzelne Kristall vom Standpunkt der Festigkeit in sich enthält. Ich glaube, daß der Kernpunkt der ganzen Ermüdungsfrage in den Unvollkommenheiten des Gefüges liegt und in den vielfachen Spalten und Lockerstellen, die wir uns in jedem Kristall vorstellen müssen. Hr. Czochralski hat ja in sehr eindrucksvoller Weise hier das Material für diese Ansicht vorgelegt. Er sagte, Glas z. B. zeige keine ausgesprochene Ermüdungsfestigkeit, die Kaltbearbeitung bei den Metallen hebe die Ermüdungsfestigkeit. Aus diesen Beobachtungen würde ich den Schluß ziehen, daß alle Stoffe, die außerordentlich feine Kriställchen haben, die Ermüdungsmöglichkeit weniger zeigen, als grobkristalline. Also die vielen Unvollkommenheiten, die Spalten usw. beeinflussen die Ausbildung der Dauerbrüche.

Ferner muß man unterscheiden zwischen Druck und Zug. Wenn ich mir z. B. eine Kaltreckung, hervorgerufen durch eine Zugbeanspruchung, vorstelle und daraufhin einen Ermüdungsversuch, so würde ich vielleicht nicht eine solche Wirkung von der Kaltbearbeitung erwarten. Aber wenn man einen Draht häufig durch eine Düse zieht und ihn auf diese Weise kaltbearbeitet hat, so wird seine Festigkeit bei der Ermüdungsbeanspruchung vielleicht höher liegen. Wie kann man das erklären? Durch den Druck werden sehr viele kleine Spalten in den Kristallen sozusagen wieder zum Verschweißen gebracht, während durch den Zug die Spalten wachsen und das Metallgefüge sich lockert. Auch die Ribbildung, die Einwirkung des Schmirgels, scheint die Ansicht zu stützen. Je nach der Schmirgelrichtung bildeten sich die Brüche aus. Das ist ein Beweis, daß der Schmirgel feine Kratzer hervorruft, die auch eine Ursache für die Veränderung der Ermüdungsfestigkeit sind.

Man muß vielleicht zusammenfassend zwei Einflüsse unterscheiden, erstens die Erhöhung der Spannung durch die grobe Kerbwirkung, durch Querschnittsänderung, Krümmungen, Löcher und dann zweitens die Kerbwirkung im kleinen, in den unendlich kleinen Spalten im Innern der Kristallite.

Geh.-Rat Mathesius, Berlin

Ich möchte Hrn. Dr. Lehr fragen, ob bei den Versuchen die Temperatur des Stabes gemessen wurde, wenn eine so starke Energieaufnahme stattfindet?

Dr.-Ing. Lehr, Darmstadt

Die Temperatur wurde bei den Dauerbiegeversuchen laufend gemessen. Die Werkstoffe, deren Dauerfestigkeit durch langfristige Wechselbeanspruchungen gehoben werden konnte, zeigten eine beträchtliche innere Arbeitsaufnahme und im Gefolge damit eine beträchtliche Temperaturerhöhung. Es gibt Siemens-Martin-Stahlsorten, die an der Ermüdungsgrenze infolge der inneren Arbeitsaufnahme eine Temperatur von 200° annehmen, ohne auch bei beliebig langer Beanspruchung zu Bruch zu gehen. Die Temperatur und innere Arbeitsaufnahme sinken allerdings langsam ab, in dem Maße, wie sich der Prüfstab verfestigt. Bei genügend langer Beanspruchung fällt die Temperatur z. B. von 200° auf etwa 80°.

Die Temperaturerhöhung infolge der Arbeitsaufnahme bedingt natürlich wesentlich andere Werkstoffeigenschaften. Wir haben deshalb den Prüfstab durch einen starken Ölstrom auf Zimmertemperatur gehalten. Die Dauerfestigkeit der gekühlten Proben lag etwa um 1 kg/mm² niedriger als bei nichtgeköhlten.

Dipl.-Ing. Melchior, Berlin

Was Hr. Dr. Lehr berichtet hat, wird durch Versuche bestätigt, die in Amerika hauptsächlich an der Universität in Illinois¹⁾ in großem Umfang durchgeführt und 1920/21 ver-

¹⁾ Vgl. Stribeck Z. d. VDI. Bd. 67 (1923) S. 631.

öffentlicht worden sind. Dort ist schon gefunden worden, daß Stäbe, von denen einige ihre Dauerfestigkeit bereits bei 10 Millionen Umläufen unter Last erwiesen hatten, dann befähigt waren, eine gesteigerte Belastung in dauerndem Wechsel zu ertragen, so daß die Ermüdungsgrenze durch die Versuche um etwa 10% gesteigert werden konnte. Es handelte sich durchweg um gezogenes und zum Teil geglähtes und auch um ungeglähtes Material.

Wie weit solche Vorgänge theoretisch zu erklären sind, darüber können wir so gut wie nichts sagen. Aber immerhin besteht doch die Möglichkeit, eine Überbeanspruchung gerade bei nicht zu harten Stählen im Gefüge nachzuweisen entgegen der Ansicht, die Hr. Czochralski vortrug. Man kann durch Ätzung nach Fry die Ermüdung nachweisen. Ich verweise auf Versuche von Müller und Leber²⁾ und Dr. E. H. Schulz. Schulz und Püngel haben ihre Versuche in den Forschungsheften der Dortmunder Union veröffentlicht³⁾. Man kann dort genau sehen, wie die Ermüdung fortschreitet. Bei nicht allzuharten Stählen läßt sich das feststellen, bei harten Stählen versagt die Frysche Ätzung.

Eine grundsätzliche Frage ist die Grenze zwischen dem rein elastischen und plastischen Gebiet. Beim vorigen Vortrag wurde die Frage gestreift; Hr. Czochralski hat sie in den Vordergrund gestellt. Da muß ich allerdings gewisse Zweifel äußern, ob eine solche Grenze tatsächlich scharf zu ziehen ist. Bekannt ist mir kein einziger Fall, in dem eine wahre Elastizitätsgrenze nachgewiesen worden wäre, auch bei Glas nicht. Im Gegenteil, bei Glas war schon Fraunhofer aufgefallen, daß planparallel geschliffene Glasplatten, wenn er sie ein Jahr aufbewahrt hatte, unter ihrem Eigengewicht sich verformt und durchgebogen hatten. Ferner haben sich die Physiker sehr eingehend mit der nicht rein elastischen Verformung von Glas beschäftigt. Ich entsinne mich z. B. an eine Veröffentlichung von Bennewitz⁴⁾, die von der elastischen Nachwirkung bei Glas handelt.

²⁾ Z. d. VDI. Bd. 65 (1921) S. 1089.

³⁾ Bd. 1 (1922) Heft 2 S. 43.

⁴⁾ Phys. Z. Bd. 21 (1920) S. 703.

Jedenfalls ist gerade bei Dauerbiegeversuchen mit Temperaturmessungen in Amerika auf einer Maschine, die wohl das Vorbild der Schenckschen Maschine ist, festgestellt worden, daß die Erwärmung, die während der Versuche auftrat, eine Funktion der Belastung, und zwar im wesentlichen proportional der Belastung war, solange die Ermüdungsgrenze nicht überschritten wurde, d. h., daß selbst bei der allerkleinsten Beanspruchung eine Erwärmung auftrat. Die Schaubilder für die Erwärmung sind auch im Bericht von Stribeck⁵⁾ über die amerikanischen Arbeiten veröffentlicht worden.

Aus der Tatsache, daß eine Temperaturzunahme selbst bei der kleinsten Belastung auftritt, geht hervor, daß überhaupt kein rein elastischer Zustand, wie man schulmäßig annehmen möchte, bei gewöhnlicher Temperatur besteht. Ich vermag auch kein Kriterium zu erkennen, wo die Grenze dieses unschädlichen nicht elastischen Verhaltens gegenüber dem schädlichen plastischen Verhalten liegt. Gerade bei den Prüfungen, wo Zug und Druck im gleichen Betrage wechseln, geht von merklichem Betrage allerdings um den Nullpunkt herum, so daß keine dauernde Formänderung der Spannungs- und Verformungszustand auftritt. Es mag sein, daß bei ungleicher Belastungsverteilung eine Formänderung eintritt, die sich bei jeder Lastperiode erhöht. So etwas ist aber bisher nicht beobachtet worden.

Es wird wohl notwendig sein, von der theoretischen hypothetisch „reinen“ Elastizitätsgrenze ganz abzusehen und statt dessen nur eine Spannungsgrenze zu betrachten, die sich eben durch die Dauerversuche ergibt, die Ermüdungsgrenze.

J. Czochralski, Frankfurt a. M.:

Ich möchte sich ganz kurz fassen: Bei der Schenk-Maschine wechseln ständig Zug- und Druckbeanspruchungen und zwar gleichmäßig über die ganze Oberfläche. Die Annahme von latenten Spaltflächen ist mir nicht besonders sympathisch. Wenn sich Spaltflächen ausbilden, so müßten diese auch nachweisbar sein. Der Einfluß der Kristallinhomogenität scheint mir auf Grund von Versuchen an Metall-Einkristallen (über die Hr. Dr. Schmid berichten wird) nicht sehr erheblich sein.

⁵⁾ Z. d. VDI. Bd. 67 (1923) S. 631.