

elektrischen Stromes an einem Deprez-d'Arsonval'schen Galvanometer, dessen Ausschlag proportional dem Wärmegrade ist, dem das Thermo-element ausgesetzt wurde.

Auch diese Instrumente, insonderheit die verwendeten Thermo-elemente, werden auf Verlangen von der Physikalisch-technischen Reichsanstalt geprüft und beglaubigt; was man jedenfalls ausführen lassen sollte, wenn es auf Zuverlässigkeit der Ergebnisse ankommt.

Man kann nach den Erfahrungen der Reichsanstalt und anderer Forscher selbst hohe Hitzegrade, wie die Schmelzpunkte von Eisen, bis auf wenige Grade genau bestimmen.

In der von Keiser & Schmidt in Berlin gefertigten Bauart (*L 172*) ist das Instrument transportfähig und ausserordentlich bequem. Die Ablesungen geschehen an einer Skala, die auf Grund der Aichungen der Reichsanstalt ausser nach Volt, auch unmittelbar nach  $C.^{\circ}$  getheilt ist. Die Messungen reichen von Zimmerwärme bis zu  $1500 C.^{\circ}$ ; die Ablesungen können bis auf einzelne Grade geschätzt werden; auch diese Instrumente sollte man vor dem Gebrauch prüfen lassen.

**308.** Für wissenschaftliche Zwecke und für die Kontrolle der Fabrication ist es bequem, die Angaben vom Instrument selbst aufzeichnen zu lassen. Roberts-Austen theilt eine hübsche Einrichtung für photographische Aufzeichnung mit (*L 171*). Bei diesem Instrument wirft der in einer kleinen Dunkelkammer stehende, mit festem und losem Spiegel versehene Galvanometer durch einen schmalen Spalt Lichtpunkte auf das photographische Papier, das auf einen vom Uhrwerk bewegten Cylinder gespannt ist; es entsteht hierdurch eine gerade Grundlinie und eine Kurve, deren Abstand von der Grundlinie ein Maass für den Hitzegrad ist. Das Instrument ist so eingerichtet, dass abwechselnd von mehreren Punkten (Oefen) aus die dort herrschenden Hitzegrade aufgezeichnet werden können.

## i. Dauerversuche.

### 1. Allgemeines.

**309.** Unter dem Namen „Dauerversuche“ pflegt man alle jene Festigkeitsversuche zusammenzufassen, bei denen die Körper nur mit verhältnissmässig geringen Spannungen aber unter oftmaliger Wiederholung beansprucht werden. Diese Versuche ahmen gewissermassen die Inanspruchnahme nach, welche das Material während seiner Thätigkeit als Konstruktions-theil erfährt. Ihre Ergebnisse bilden die Grundlage für die heutigen Anschauungen über das zulässige Maass der Materialbeanspruchung in allen unsern Konstruktionen, und deswegen ist es nothwendig, dass die Art und Ausführung der Dauerversuche, sowie die wesentlichen Ergebnisse der bisherigen Versuche hier ganz kurz berührt werden; das tiefere Eingehen ist Sache der Konstruktionslehre.

**310.** Wenn auch vor Wöhler Andere schon sich mit Versuchen befassten, die man zu den Dauerversuchen zählen muss, so pflegt man ihn doch immer als den eigentlichen Begründer (*L 174*) zu nennen, nach dem man diese Versuche auch wohl als Wöhler'sche Versuche zu bezeichnen pflegt. Selbst die Wöhler'schen Konstruktionen für Dauerversuchsmaschinen sind vielfach von anderen Forschern übernommen, und die alten von



Wöhler selbst benutzten Maschinen sind erhalten und dienen zur Fortführung der von ihm begonnenen Versuche in der Charlottenburger Versuchsanstalt.

Unter den Vorgängern Wöhlers will ich hier nennen Albert, der 1829 schon Dauerversuche mit Förderketten anstellte (*L 176*), und W. Fairbairn, der 1864 über Dauerversuche mit Brückenträgern berichtete (*L 177*). Neuerdings sind die Wöhlerschen Versuche vielfach erweitert worden, und namentlich in Amerika scheint man ihnen mehrere Stätten eröffnet zu haben. Besonders hat Bauschinger die Wöhlerschen Versuche wesentlich ergänzt; auf seine Arbeiten wird im folgenden Abschnitt näher einzugehen sein.

**311.** Je nach der Art der Beanspruchung unterscheidet man verschiedene Formen des Dauerversuches, nämlich Dauerversuche mit Beanspruchung auf Zug, Biegung in einer Ebene, Biegung nach allen Richtungen, Verdrehung, Zug und Biegung, Schlagwirkung unter Zug-, Druck-, Biegungs-, Verdrehungsbeanspruchung u. s. w.

**312.** Für alle diese Beanspruchungsformen ergibt sich, dass sie den Probekörper nur dann durch eine sehr grosse Zahl von Wiederholungen zu Bruche bringen, wenn die jedesmal erzeugte Spannung [im Folgenden die Anspannung  $\sigma_A$  genannt] über ein gewisses, dem Material eigenthümliches Maass hinausgeht. Diese Grenzspannung nannte Launhardt die Arbeitsfestigkeit  $\sigma_N$  des Materiales.

## 2. Die Veränderlichkeit der Proportionalitäts- und Streckgrenze.

**313.** Seitdem man begann, Festigkeitsversuche mit einiger Genauigkeit auszuführen, ist es eine bekannte Thatsache, dass die Beanspruchung eines Körpers über eine gewisse Grenze hinaus eine Veränderung der Eigenschaften des Materiales im Gefolge hat. Diese Veränderungen erstrecken sich ganz besonders auch auf die Lage der Proportionalitäts- und Streckgrenze. Schon bei der kurzen Besprechung der Nachwirkungserscheinungen, dass nämlich das Material nach Hervorbringung eines neuen Spannungszustandes keineswegs sofort zur Ruhe kommt und den dem neuen Spannungszustande zukommenden Gleichgewichtszustand durchaus nicht sofort annimmt (*53, S. 28*), wurde erwiesen, dass Minuten, Tage, Monate, Jahre darüber vergehen, bis das Material seine Länge nicht mehr verändert.

**314.** Die Erscheinungen, die ich jetzt zu besprechen habe, sind ähnlicher Natur. Für unsere Zwecke sind sie besonders anschaulich von Bauschinger (*L 111. 178*) bei seinen Versuchen an Schweisseisen, Flusseisen und anderen Metallen beobachtet und dargestellt. Andere Forscher haben früher und später ähnliche Erfahrungen gesammelt und darüber berichtet. Hier soll in erster Reihe auf die Bauschingerschen Versuche eingegangen werden, weil sie besonders geeignet sind, die an sich früher festgestellten Erfahrungen Wöhlers verständlich zu machen. Ich darf es aber nicht unterlassen, von vornherein hervorzuheben, dass die nachfolgend ausgesprochenen Bauschingerschen Sätze nicht verallgemeinert werden dürfen, sondern als Erfahrungssätze streng genommen nur auf die von ihm geprüften Materialgattungen angewendet werden sollten, wenn auch die Wahrscheinlichkeit vorliegt, dass andere Materialien ihnen folgen.

a) Wenn ein Körper mit Kräften auf Zug beansprucht wird,



die von Null anwachsend Spannungen erzeugen, welche grösser als die Proportionalitätsgrenze des Materiales sind, so wird diese Grenze geändert, sofern sich das Material nicht bereits in einem künstlich veränderten Zustande befand. Wenn das Material sofort nach der Entlastung wieder geprüft und die neue  $P$ -Grenze festgestellt wird, so findet man diese höher liegend als die ursprüngliche  $P$ -Grenze. Lässt man, den Versuch immer wiederholend, die Spannung, welche die Erhöhung erzeugte, allmählig anwachsen, so wird man eine weitere Erhöhung der  $P$ -Grenze finden, bis zu dem Augenblick, in welchem die Spannung die Streckgrenze des Materiales erreicht oder um ein Geringes überschreitet<sup>1)</sup>.

Nennt man diejenige  $P$ -Grenze und diejenige  $S$ -Grenze, von der wir ausgingen, die ursprüngliche Proportionalitäts- oder Streckgrenze,  $\sigma_{Pu}$  und  $\sigma_{Su}$ , bezeichnet man ferner zur klareren Unterscheidung diejenige Spannung, welche diese Grenzen verändern soll, als die Anspannung  $\sigma_A$  und nimmt man bei allen folgenden Betrachtungen als Grundbedingung an, dass die ursprünglichen Grenzen dem Material in seinem gewöhnlichen Zustande eigen sind, dass sie also auf keine Weise bereits künstlich verändert waren, so kann man ein Schaubild von dem soeben entwickelten Gesetz entwerfen.

Die zeichnerische Darstellungsweise soll auch für die Versinnbildlichung der folgenden Gesetze angewendet und gleiche Vorgänge sollen immer in gleicher Weise gezeichnet werden. Dabei werden die Belastungsarten (Anspannungsarten) durch strichpunktirte Pfeile, die hierdurch erzeugten Veränderungen der  $P$ -Grenzen durch feingezeichnete und diejenigen der  $S$ -Grenzen durch stark gezeichnete Pfeile gekennzeichnet werden. Die durch Zugbeanspruchungen erzeugten Veränderungen der  $P$ - und  $S$ -Grenzen werden durch ausgezogene, die durch Druckbeanspruchungen erzeugten, durch punktirte Linien angedeutet. Die Spannungen werden, wie früher, die Zugspannungen nach oben, die Druckspannungen nach unten aufgetragen.

Unter diesen Voraussetzungen ist das oben unter  $a$ ) ausgesprochene Gesetz durch Fig. 208 bis zur Grenze  $a$  dargestellt.

$b$ ) Bei wachsender Anspannung (Theil  $a$ , Fig. 208) wächst die  $P$ -Grenze bis zu einem Maximum, und in dem Augenblick, in welchem die Anspannung die ursprüngliche  $S$ -Grenze ( $S_u$ ) erreicht, nimmt die  $P$ -Grenze ganz erheblich ab. Bei stärkerer Ueberschreitung der  $S$ -Grenze kann die  $P$ -Grenze bis auf Null herabsinken (Theil  $b$ , Fig. 208).

$c$ ) Ueberlässt man den Stab nach der Entlastung der Ruhe, so erhebt sich mit der Zeit, erst schnell, dann langsamer die  $P$ -Grenze; sie kann im Laufe der Jahre bis über die ursprüngliche  $S$ -Grenze und unter Umständen selbst bis über die Höhe der vorausgehenden Anspannung anwachsen (Theil  $c$ , Fig. 208).

$d$ ) Durch die Anspannung über die ursprüngliche  $S$ -Grenze hinaus wird auch diese gehoben und zwar schon unmittelbar

<sup>1)</sup> Man kann aus dem Satz  $a$ ) den für das Materialprüfungswesen unter Umständen wichtigen Schluss ziehen, dass es schon unzulässig ist, innerhalb der  $P$ -Grenze Entlastungen vorzunehmen, wenn die Bestimmung der  $P$ -Grenze Aufgabe des Versuches ist. Es gibt aber auch andere Gründe, die die Entlastung während des Versuches unter Umständen misslich erscheinen lassen.

nach der Anspannung. In der Ruhe nach geschעהer Entlastung hebt sich die Streckgrenze im Laufe der Zeit bis über die Anspannung hinaus (Theil *d*, Fig. 208). Diese Hebung ist schon nach einem Tage sehr gut bemerkbar, dauert aber Wochen, Monate und Jahre fort.

e) Durch die Anspannung über die ursprüngliche S-Grenze hinaus wird auch der Elasticitätsmodul  $1/a = E$  erniedrigt [d. h. die Dehnungszahl  $a$  vergrößert], Fig. 209. In der Ruhe nach geschעהer

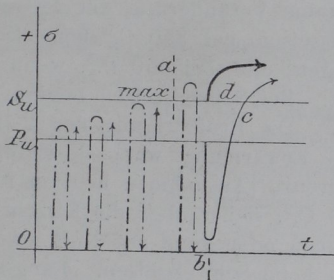


Fig. 208.

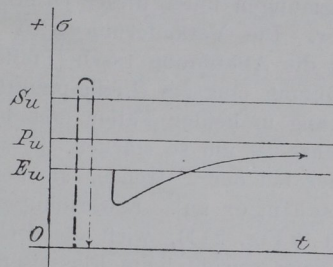


Fig. 209.

Entlastung hebt sich der Elasticitätsmodul, aber langsamer als die P-Grenze. Nach mehreren Jahren findet er sich beträchtlich über seine ursprüngliche Grösse erhoben. [NB. Bauschinger führt Ausnahmen hiervon an.]

f) Wenn durch Anspannung über die ursprüngliche Streckgrenze hinaus und darauf folgende Ruhe nach der Entlastung, die P- und die S-Grenze gehoben sind, so werden durch heftige Erschütterung des Stabes, z. B. Hämmern im kalten Zustande, die P- und S-Grenzen wieder erniedrigt, Fig. 210. Hierbei sinkt die S-Grenze nur wenig und bleibt höher als die ursprüngliche S-Grenze (*a* Fig. 210). Die P-Grenze geht ganz bis auf die ursprüngliche P-Grenze zurück, wenn beim Hämmern keine Verlängerung des Stabes erzeugt wurde (*b* Fig. 210). Wenn aber beim

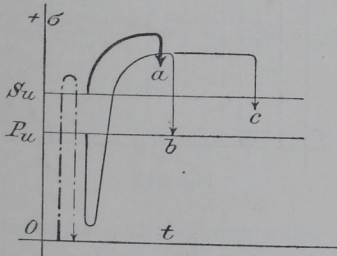


Fig. 210.

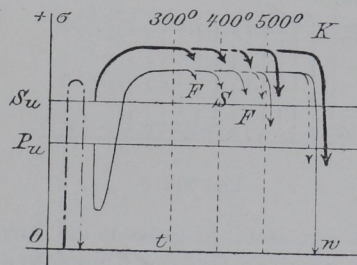


Fig. 211.

Hämmern eine Verlängerung eintritt, so wird die P-Grenze nur etwas, aber nicht bis zur ursprünglichen P-Grenze erniedrigt<sup>1)</sup> (*c* Fig. 210).

g) Wenn durch Anspannung über die ursprüngliche Streckgrenze

<sup>1)</sup> Das ist schwer verständlich, wenn man bedenkt, dass die Verlängerung beim Hämmern ja die gleiche Wirkung haben musste, wie die Formänderung beim Zugversuch. Deswegen sollte nach Gesetz *b* erst recht eine erniedrigende Wirkung eintreten. Dieser Punkt scheint weiteren Studiums werth zu sein.



hinaus und darauf folgende Ruhe nach der Entlastung die  $P$ - und  $S$ -Grenzen gehoben sind, so werden durch starke Erwärmung des Stabes die  $P$ - und  $S$ -Grenzen wieder erniedrigt, Fig. 211. Die Art der Abkühlung spielt hierbei eine wesentliche Rolle, insofern als rasche Abkühlung des erwärmten Stabes viel energischer wirkt als langsames Abkühlen. Die Wirkung der Erwärmung auf Eisen [in Fig. 211 bedeutet  $F$  Flusseisen und  $S$  Schweisseisen] beginnt erst von  $350\text{ C.}^0$  ab. Selbst zehnmal wiederholte Erwärmungen unter dieser Grenze rufen keine Veränderung der  $P$ -Grenze hervor. Die Veränderung wird beim Flusseisen bei  $350\text{ C.}^0$  bemerkbar, wenn die Abkühlung rasch [Pfeile ausgezogen] und bei  $450\text{ C.}^0$ , wenn die Abkühlung langsam [Pfeile punktirt] erfolgt. Bei Schweisseisen beginnt die Wirkung in beiden Fällen erst bei  $400\text{ C.}^0$ . Die Erniedrigung der  $P$ - und  $S$ -Grenze ist um so stärker, je stärker die Erwärmung war; sie ist energischer bei der  $P$ -Grenze, als bei der  $S$ -Grenze [Ausnahmen hiervon führt Bauschinger an]. Erwärmungen auf  $500\text{ C.}^0$ , sicher aber die Kirschrothgluth ( $k$  Fig. 211), wirft die  $P$ -Grenze nahezu oder ganz auf Null herab<sup>1)</sup> und zwar sowohl beim Flusseisen als auch beim Schweisseisen. Langsame Abkühlung bewirkt selbst nach voraufgegangener Rothgluth keine so starke Erniedrigung der  $P$  Grenze.

Die Zeit der Ruhe nach dem Erwärmen und Erkalten hat keinen Einfluss mehr auf die durch Erwärmen erniedrigte  $P$ - und  $S$ -Grenze.

*h)* Wird die Anspannung zwischen den Grenzen  $0$  und  $+\sigma$  oftmals wiederholt [Schwingungen der Anspannung zwischen  $0$  und  $+\sigma$ ] und bleibt  $\sigma$  zwischen den ursprünglichen  $P$ - und  $S$ -Grenzen, so wird im Laufe der Zeit die  $P$ -Grenze selbst bis über, und zwar manchmal weit über die Höhe der Anspannung und über die ursprüngliche  $S$ -Grenze hinaus erhöht, Fig. 212. Diese Erhöhung ist

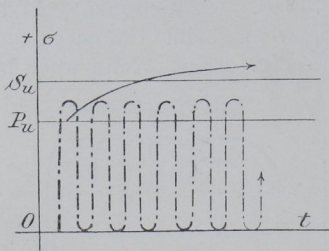


Fig. 212.

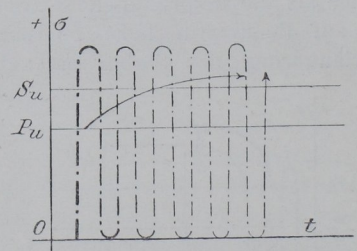


Fig. 213.

um so grösser, je grösser die Anzahl der Schwingungen ist, ohne aber eine gewisse Grösse überschreiten zu können. [Bauschinger giebt Ausnahmen hiervon an.]

*i)* Wird die obere Grenze der Schwingungen erhöht, so kann schliesslich die  $P$ -Grenze auch durch eine sehr grosse Zahl von Schwingungen nicht mehr bis an die obere Anspannungsgrenze gehoben werden, Fig. 213.

<sup>1)</sup> Von Interesse würde es sein, festzustellen, ob durch Erschütterung eine so tief herabgeworfene  $P$ -Grenze gehoben werden kann, denn sie hat offenbar nicht ihre natürliche Lage. Ebenso sollte versucht werden, ob durch starke magnetische oder elektrische Erregungen künstlich veränderte  $P$ - und  $S$ -Grenzen verändert werden können.

k) Wenn die erhobene  $P$ -Grenze die obere Anspannungsgrenze noch übersteigen kann, so führt selbst eine sehr grosse Zahl von Schwingungen [mehrere Millionen] nicht den Bruch herbei. Ueberschreitet aber die obere Anspannungsgrenze die noch erreichbare Höchstlage der  $P$ -Grenze, so muss der Bruch nach einer beschränkten Anzahl von Schwingungen erfolgen.

l) Die Bruchgrenze  $\sigma_B$  zeigt sich durch millionenmal wiederholte Anspannungen nicht vermindert, eher erhöht, wenn die Stäbe nachher mit ruhender Belastung zerrissen werden.

Leider kann man aus den Bauschingerschen Versuchen nicht mit hinreichender Sicherheit Erfahrungen über die Veränderungen der Formänderungsfähigkeit  $\delta$  u.  $q$  ableiten. Man darf aber wohl aus den allgemeinen Erfahrungen der Technik schliessen, dass die Formänderungsfähigkeit mit der oft wiederholten Anspannung allmählig erschöpft wird, wenn die Anspannung das durch das Gesetz  $k$  angedeutete Maass überschreitet. Es würde von grossem Interesse sein, wenn fernere Untersuchungen sich dieser Frage zuwendeten, wenn insbesondere festgestellt würde, in welchem Maasse  $\delta$  und  $q$  sich unter den in Satz  $h$ ) und  $i$ ) angegebenen Bedingungen ändern.

Bisher wurden die Wirkungen betrachtet, die die Anspannungen auf Zug auf die  $P$ -,  $S$ - und  $B$ -Grenze für Zugspannung ausüben. Diese Anspannungen auf Zug beeinflussen aber auch die  $-P$ - und  $-S$ -Grenze für Druckbeanspruchung. Umgekehrt beeinflusst die Anspannung auf Druck die  $+P$ - und  $+S$ -Grenze für Zug. Die Gesetze, nach denen diese Beeinflussungen verlaufen, sind die folgenden.

m) Durch eine Anspannung über die ursprüngliche  $+P$ -Grenze hinaus wird die ursprüngliche  $-P$ -Grenze des Stabes erniedrigt, und zwar um so mehr, je grösser die Anspannung war, Fig. 214.

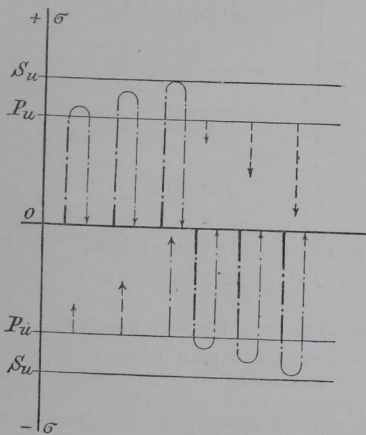


Fig. 214.

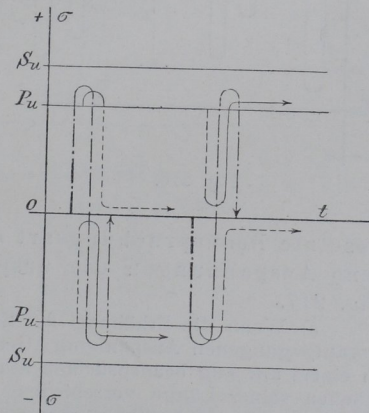


Fig. 215.

Schon verhältnissmässig geringe Ueberschreitung der  $+P$ -Grenze wirft die  $-P$ -Grenze bis auf Null herab.

Durch eine Anspannung über die ursprüngliche  $-P$ -Grenze hinaus wird in gleicher Weise die  $+P$ -Grenze bis auf Null herabgeworfen.

n) Wenn durch Anspannung im entgegengesetzten Sinne die  $-P$ - oder



die  $+$   $P$ -Grenze durch Anspannung auf Druck, beziehentlich Zug [entsprechend dem früher besprochenen Gesetze  $a$ )] wieder gehoben und dann überschritten wird, so fällt sofort die  $P$ -Grenze für die entgegengesetzte Anspannungsart auf Null herab, Fig. 215.

Die Zeit der Ruhe nach der Entlastung ist bei diesen Vorgängen ohne, oder doch nur von geringem Einfluss, d. h. die durch entgegengesetzte Anspannung erniedrigte  $P$ -Grenze für Druck oder Zug hebt sich wenigstens im Verlauf der nächsten 3 bis 4 Tage nicht wieder, und im Laufe der nächsten Wochen, wenn überhaupt, so doch nur wenig, Fig. 221.

*o*) Eine durch entgegengesetzte Anspannung, die grösser ist als die ursprüngliche  $P$ -Grenze, herabgeworfene  $P$ -Grenze, kann durch allmählig anwachsende zwischen Zug und Druck wechselnde Anspannung wieder gehoben werden, aber nur bis zu einer Grösse, die beträchtlich unter der betreffenden ursprünglichen  $P$ -Grenze liegt, Fig. 216.<sup>1)</sup>

*p*) Durch allmählig anwachsende, zwischen Zug und Druck wechselnde Anspannung kann die  $P$ -Grenze für die entgegen-

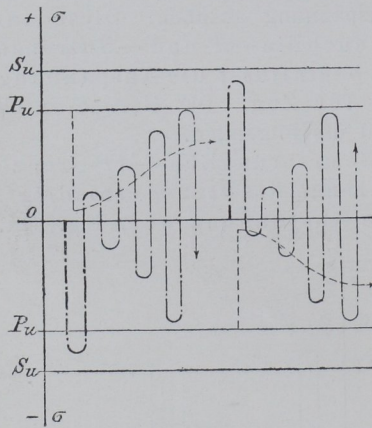


Fig. 216.

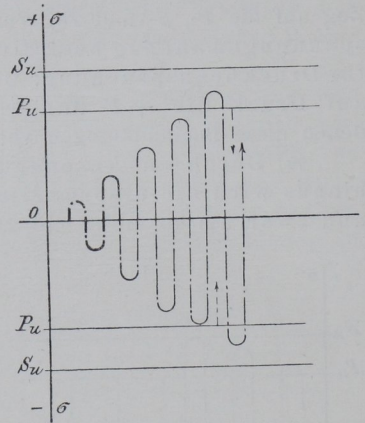


Fig. 217.

gesetzte Beanspruchungsart erst dann erniedrigt werden, wenn jene Anspannungen die ursprüngliche  $P$ -Grenze überschreiten, Fig. 217.

*q*) Wenn die Erhöhung der Streckgrenze abhängig ist von der Höhe der vorausgegangenen Anspannung (Gesetz  $a$  und  $b$ ), so sollte man annehmen, dass in einem auf Zug beanspruchten Stabe sich diese Erhöhung in den verschiedenen Theilen seiner Länge verschieden gestalten müsste. Und zwar müsste die Erhöhung in der Stabmitte stärker als an den Enden, in der Einschnürung stärker als in den nicht eingeschnürten Theilen stattfinden, d. h. die Form der Dehnungsschaulinien (133, S. 84) müsste eine Aenderung erfahren, wenn der Stab mit Ruhepausen durch wiederholte Anspannungen zerrissen wird.

*r*) Um das Zutreffen dieser Ueberlegung zu prüfen, liess ich aus der gleichen Stange Flusseisen fünf Rundstäbe von 2,0 cm Durchmesser,  $lq = 12,5 \sqrt{f}$  anfertigen

<sup>1)</sup> Man darf vermuthen, dass Erschütterungen und Ausglühen in gleichem Sinne wirken, was durch den Versuch festgestellt werden sollte.

und so prüfen, dass die Stäbe zunächst bis zur Höchstspannung  $\sigma_B$  angespannt wurden. Dann wurde die Dehnung in den einzelnen Theilungen ( $l = 0,565 \sqrt{l}$ ) gemessen, und hierauf wurden die Stäbe nach verschieden langer Ruhepause wieder bis zum eintretenden Strecken angespannt, ausgemessen und wieder wie früher behandelt; die Versuche wurden unter Benutzung des Selbstzeichners der Maschine ausgeführt. Wenn auch die so erhaltenen Schaulinien nicht die reine Dehnung der Messlänge des Stabes darstellen [die Bewegungen der Trommel wurden von

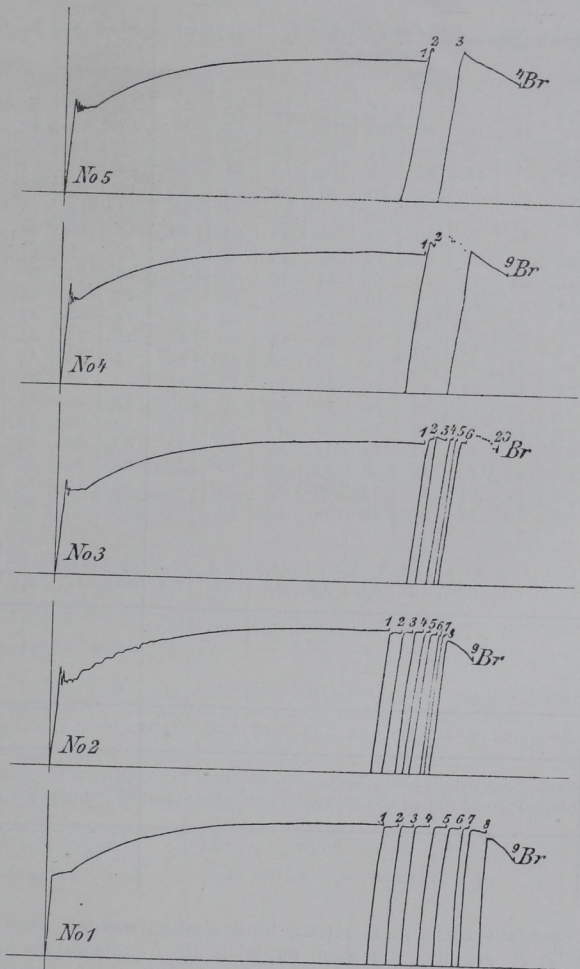


Fig. 218.

den Maschinentheilen abgeleitet], so geben die Schaubilder doch eine schnellere und verständlichere Uebersicht als Tabellen dies vermöchten; sie sind daher in Fig. 218 zusammengestellt. An die erste Schaulinie von jedem Stabe, die also das Verhalten des Materiales im ursprünglichen Zustande darstellt, sind lose die Schaubilder von den einzelnen Streckungen angereiht. Die Ruhepausen nach der Entlastung waren beim Stabe 1 so kurz wie möglich; beim Stabe 2 betragen sie etwa 1 Tag, und beim Stabe 3 anfangs eine Woche; leider ist dann aber infolge von Personalwechsel und Arbeitsüberhäufung eine längere Unterbrechung eingetreten, die sich störend bemerkbar machte. Für Stab 4 war die Dauer der Ruhepausen von je 1 Monat und für Stab 5 von je  $\frac{1}{2}$  Jahr vorgesehen; diese Anordnungen



Tabelle 25. Einfluss wiederholten Streckens und der Ruhezeit

Theilung No.	Verlängerungen der einzelnen Theilung																
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	2	3	4	5	6	7	8
	Stab No. 1. $f = 3,15$ qem; $\sigma_s = 3270$ at									Stab No. 2. $f = 3,17$ qem; $\sigma_s = 3860$							
0-1	14	15	15	15	15	16	15	15	15	15	16	18	18	18	18	18	18
1-2	16	15	15	16	16	16	17	17	18	19	19	18	18	19	19	19	19
2-3	17	20	20	20	21	21	21	22	20	19	20	20	20	20	20	20	20
3-4	17	17	18	19	20	19	19	18	19	19	19	19	19	19	19	19	19
4-5	19	20	19	20	20	20	22	22	22	17	16	17	17	18	18	18	18
5-6	19	19	20	21	20	21	21	21	21	17	17	18	18	17	17	17	17
6-7	19	20	21	20	23	22	22	22	22	17	18	19	19	18	18	18	18
7-8	21	22	22	24	23	25	23	23	23	18	18	17	18	19	19	19	19
8-9	21	22	23	24	24	24	26	26	26	19	19	20	19	20	20	21	21
9-10	20	23	23	25	26	26	26	26	26	22	23	24	24	22	22	21	21
10-11	21	23	24	24	25	26	25	26	26	23	22	25	25	28	30	30	30
11-12	22	22	23	24	24	24	24	25	25	25	25	25	27	29	28	29	29
12-13	20	22	21	23	25	24	26	25	25	22	24	25	27	27	29	28	28
13-14	21	22	24	27	25	26	24	27	27	23	26	25	27	26	26	27	27
14-15	21	23	25	24	29	30	31	30	30	23	25	25	25	26	25	24	26
15-16	22	22	24	27	30	33	38	45	58	22	24	25	26	27	30	31	31
16-17	21	23	26	27	29	35	35	44	77	23	25	16	28	30	32	34	43
17-18	21	22	25	26	28	27	33	30	30	24	24	25	28	28	30	33	36
18-19	20	21	21	21	23	26	22	30	24	20	19	24	24	24	26	24	26
19-20	17	19	18	20	20	20	19	20	20	19	19	20	20	21	20	21	21
Mittel	19,5	20,6	21,4	22,4	23,3	24,1	24,5	25,7	27,7	20,3	21,4	21,8	22,4	22,8	23,3	23,6	24,4
Unterschiede	19,5	1,1	0,8	1,0	0,9	0,8	0,4	1,2	2,0	20,3	1,1	0,4	0,6	0,4	0,5	0,3	0,8
Zeit Minuten	0	30	70	90	100	110	130	160	165	—	—	—	—	—	—	—	—
Ruhepause (Minuten) Tage	(0)	(30)	(40)	(20)	(10)	(10)	(20)	(30)	(5)	0	1	1	1	1	1	2	1
Kleinste $f_1$ qem	2,61	2,57	2,54	2,50	2,43	2,35	2,27	2,06	1,47	2,60	2,57	2,54	2,51	2,49	2,45	2,40	2,32
$\sigma = P/f$ at	5490	5500	5505	5510	5500	5490	5420	5400	5120	5610	5650	5620	5640	5610	5520	5560	5500
$\sigma_1 = P/f_1$ at	6630	6750	6820	6940	7120	7360	7550	8260	11000	6830	6980	7010	7110	7120	7150	7320	7520
	$\delta_{5,6} = 34,0\%$ ; $\delta_{11,3} = 29,5\%$ ; $q = 54\%$ ; $\sigma_B = 5510$ at; $\sigma_2 = 5120$ at									$\delta_{3,6} = 33,6\%$ ; $\delta_{10,3} = 29,0\%$ ; $q = 43$ ; $\sigma_B = 5650$ at; $\sigma_2 = 5340$ at							

sind indessen ebenfalls nicht ganz streng innegehalten worden, wie sich aus der folgenden Tabelle 25 ergibt, die auch zugleich die Aenderungen in den Streckgrenzen enthält, bezogen auf den ursprünglichen und den kleinsten Querschnitt im Stabe vor der jedesmaligen Anspannung.

s) Man sieht aus den Schaulinien Fig. 218, dass die Wirkung der Ruhe auf die Erhöhung der  $S$ -Grenze ganz deutlich sichtbar, bereits bei Stab 3 [1 Woche Ruhepause] hervortritt und sich bei den Stäben 4 und 5 in verstärktem Maasse zeigt. Ganz besonders tritt aber diese Erhöhung bei den letzten nach längerer Ruhepause ausgeführten Versuchen in Reihe 3, 4 und 5 hervor<sup>1)</sup>; eine Bestätigung des Gesetzes  $d)$  (314) von Bauschinger. Der erste Satz dieses Gesetzes, dass nämlich die Streckgrenze sofort fast auf die Grösse der vorausgehenden An-

<sup>1)</sup> Die Ergebnisse konnten nur als Punkte in die Schaubilder eingetragen werden, weil jedesmal nur die neue Streckgrenze und die bleibende Dehnung nach dem Versuch bestimmt wurden.

e Dehnungs-Schaulinie von Normalrundstäben aus Flusseisen.

$\epsilon \cdot 10^{-2}$  nach Versuch No.

2	3	4	5	6	10	15	20	1	2	3	4	5	6	8	1	2	3	
Stab No. 3. $f = 3,16$ qcm; $\sigma_s = 3750$ at								Stab No. 4. $f = 3,17$ qcm; $\sigma_s = 3680$ at								Stab No. 5. $f = 3,17$ qcm; $\sigma_s = 3650$ at		
16	16	16	16	16	16	17	17	16	17	17	17	17	18	18	17	17	17	
19	19	19	19	19	19	19	19	21	20	20	20	20	20	20	20	19	18	
20	20	20	20	20	20	19	19	22	23	22	22	23	22	22	21	23	23	
22	23	23	23	23	23	23	22	22	24	23	23	23	22	23	27	26	26	
25	25	25	25	24	25	26	25	21	20	20	20	21	20	21	31	31	33	
26	33	33	35	39	40	44	46	20	21	20	20	20	21	20	31	32	31	
26	34	37	38	41	44	50	58	19	19	20	20	20	21	20	25	25	25	
26	28	27	28	29	28	29	28	20	19	20	20	20	20	20	21	22	22	
23	24	25	23	24	24	24	24	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	
24	23	22	23	23	22	22	23	24	21	22	22	21	22	22	20	20	20	
21	22	21	23	22	23	23	23	21	24	22	23	22	22	22	19	18	19	
22	20	22	21	21	22	21	21	22	22	23	23	24	23	23	20	19	18	
21	23	21	21	21	21	21	21	27	27	27	26	24	25	25	18	18	19	
21	21	21	21	21	21	21	21	26	30	30	30	32	31	33	20	20	20	
20	20	21	20	20	20	20	20	27	30	31	31	30	32	40	19	18	19	
21	19	22	21	20	21	20	21	24	26	26	27	27	28	33	17	20	19	
21	20	20	20	20	21	20	20	22	22	23	22	23	23	24	17	17	18	
19	20	20	20	21	21	22	21	20	21	20	21	21	20	19	16	18	16	
20	20	20	20	19	20	19	19	18	17	18	18	17	16	17	17	15	17	
21,7 0,4	22,5 0,8	22,8 0,3	22,9 0,1	23,2 0,3	23,6 0,6	24,1 0,5	24,5 0,4	21,7 21,7	22,2 0,5	22,3 0,1	22,4 0,1	22,4 0,0	22,4 0,0	23,2 0,8	20,8 20,8	20,8 0,0	20,9 0,1	
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
7	14	21	28	35	368 <sup>1)</sup>	403	438	0	30	342	372	403	433	493	0	244	344	
7	7	7	7	7	333	5×7	5×7	0	30	312	30	31	30	60	0	244	100	
2,53	2,43	2,41	2,41	2,41	2,06	1,87	1,69	2,53	2,51	2,49	2,46	2,37	2,37	2,17	2,48	2,49	2,45	
5630 7020	5880 7610	5730 7510	5610 7360	5620 7380	5710 8800	5350 9100	5200 9700	5450 6820	5960 7510	6130 7820	6070 7840	6060 8140	6060 8140	5630 8300	5450 6950	5970 7600	6000 7780	
$\delta_{5,6} = 29,0\%$ ; $\delta_{11,3} = 24,6\%$ ; $l = 46\%$ ; $\sigma_B = 5880$ at; $\sigma_2 = 5200$ at								$\delta_{5,6} = -0\%$ ; $\delta_{11,3} = -0\%$ ; $q = -0\%$								$\delta_{5,6} = -0\%$ ; $q = -0\%$ ; $\delta_{11,3} = -0\%$		

spannung gehoben wird, entspricht ja der alltäglichen Erfahrung bei den meisten Materialien; er ist ohne weiteres aus den Schaubildern für Stab 1 und 2 abzulesen. Namentlich bei Stab 1 haben die an einander gereihten Schaubilder kaum einen anderen Verlauf, als man ihn erhalten haben würde, wenn man den Stab sofort ohne Entlastung zu Bruche gebracht hätte. Stab 3 bis 5 zeigen dagegen charakteristische Erhebungen über die voraufgehende Anspannung hinaus.

b) Um bei den Schaubildern zu bleiben, sei noch auf den kurzen Verlauf der Linien in den einzelnen Wiederholungen verwiesen. Während sich diese kurzen Linien [im Gegensatz zu dem längeren Theil bis zur neuen Streckgrenze verstanden] bei Stab 1 und 2 bis zum Bruch ganz gut an den allgemeinen Verlauf der Schaulinie anschließen, wie sie ohne Entlastung gewonnen worden wäre, zeigen die Wiederholungen namentlich bei Stab 4 und 5 einen sofortigen Abfall der Linie nach Erreichung der neuen Streckgrenze. Das kann entweder durch

1) Zwischen Versuch 6 und 7 liegt ein Zwischenraum von 321 Tagen.



die Art der Versuchsausführung [die Versuche wurden auf der 50-ton-Pohlmeier-Maschine gemacht] bedingt sein, oder das Material wiederholt den Charakter der ersten Streckgrenze, der bei den Linien 2 bis 5 sehr klar hervortritt. Bei sehr langsamem Vorgehen, so dass die Trägheit der Massen im Kraftmessapparat möglichst wenig hervortritt, fällt häufig die Linie ganz plötzlich, wie in Fig. 219 in grösserem Maassstabe für verschiedene Fälle gezeichnet ist, um dann meistens nach einigen Schwingungen des Hebels den für viele Eisenarten charakteristischen Ansatz zu bilden, bis wieder regelrechtes Ansteigen der Linie erfolgt. Die Schwingungen, wie sie bei *a* angegeben sind, sind Schwingungen des Pendels um seine Ruhelage, die es annehmen würde, wenn der Abfall nicht so plötzlich eingetreten wäre. In *b* ist die Form der Schaulinie für diesen Fall verzeichnet.

Fig. 219.

der Schaulinie für diesen Fall verzeichnet.

Nachdem man in letzter Zeit diesen Vorgängen an der Streckgrenze erhöhte Aufmerksamkeit schenkte,<sup>1)</sup> ist es wohl wichtig, die Frage aufzuwerfen, ob der

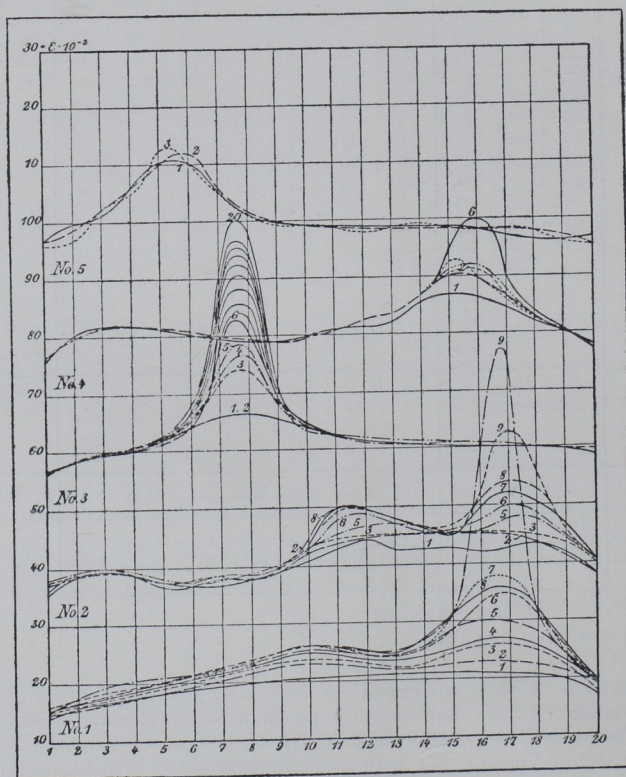


Fig. 220.

schnelle Abfall an der erhöhten Streckgrenze Aehnlichkeit mit diesen Vorgängen an der Streckgrenze im ursprünglichen Zustande des Materiales hat. Ich werde hierauf noch zurückkommen.

u) Um die oben unter *q*) gestellte Frage zu prüfen, trug ich nach den Beobachtungswerten, die ich a. a. O. ausführlicher besprechen will, die Dehnungs-

<sup>1)</sup> Man knüpfte hieran Betrachtungen über verschiedene allotrope Zustände des Eisens (Osmond u. a.).

schaubilder für jeden Versuch einzeln auf und zeichnete für jedes die Ausgleichsline unter möglichst getreuer Anschmiegung an die Einzelwerthe. Die Dehnungsschaulinien habe ich dann in Fig. 220 zusammengetragen.<sup>1)</sup> Diese Schaubilder deuten an, was selbstverständlich noch durch eine grosse Zahl von Versuchen mit anderem Material bestätigt werden muss, dass

beim Material im ursprünglichen Zustande, d. h. bei Wiederholung ohne nennenswerthe Ruhepause (Stab 1), der ganze Stab bei der wiederholten Anspannung an der Vergrösserung der Dehnung theilnimmt, dass aber der Hauptantheil auf die bei der ersten Anspannung am meisten gedehnten Stabtheile entfällt.

Man sieht an dem Linienverlauf deutlich, in welcher Weise die Einschnürung sich bildet. Bei Stab 2 liegen die Linien am Anfang links schon näher bei einander, aber es hat sich bei den Versuchen 6—9 links von der Haupteinschnürung noch eine zweite gebildet, und zwar an einer Stelle, die sich auch anfangs bereits stark dehnte. Die Linien für die Stäbe 3 bis 5 fallen der Hauptsache nach nahezu in einander, nur an der zuerst am stärksten gedehnten Stelle findet wesentliche Dehnung infolge der wiederholten Anspannung statt. Bei diesen Versuchen ist aber die für jede Anspannung erzeugte Theildehnung wesentlich geringer genommen als bei den vorausgehenden, so dass weitere Schlussfolgerungen aus der in die Augen springenden Abweichung nicht gezogen werden dürfen. Ich hoffe, dass diese unbeantworteten Fragen auch von anderer Seite verfolgt werden.

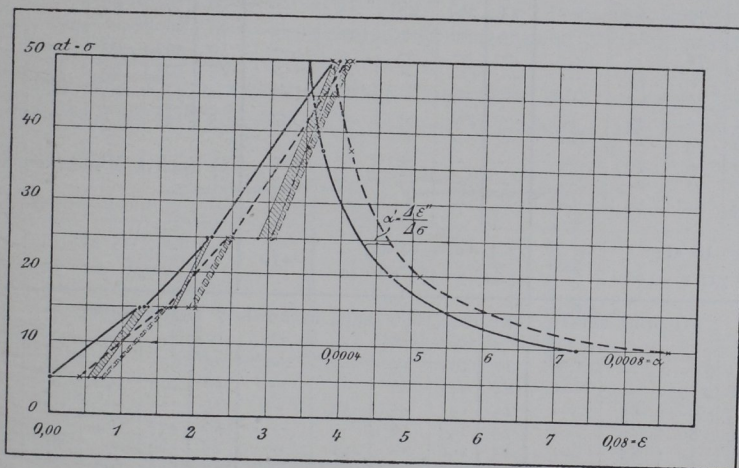


Fig. 221.

v) Durch die neueren Versuche über die Bestimmung des elastischen Verhaltens der Materialien, z. B. durch diejenigen von Bach (L 112. 136. 137), Hartig (L 179. 180), Martens (L 107. 109. 157) u. A. dürfte nunmehr wohl feststehen, dass in den meisten Stoffen durch hinreichend feine Messwerkzeuge in der Regel Änderungen des Materialzustandes mit jeder Beanspruchung einhergehen. Wenn man eine Anzahl von Belastungen und Entlastungen hinter einander vornimmt, so ändern sich fast stets die Ablesungen bei jedem Wechsel zwischen zwei Spannungsgrenzen. Sie nehmen nach einer gewissen Zahl von Wiederholungen gleichbleibende Werthe an, indem die bleibende Formänderung mit jeder folgenden Entlastung kleiner wird, bis zuletzt nur noch eine elastische Formänderung stattfindet. Die Formänderungen für die Spannungseinheit  $\left(\frac{\Delta \varepsilon}{\Delta \sigma}\right)$ , die Dehnungs-, Biegungszahlen u. s. w., berechnet aus den Formänderungen im Zustande der schliesslich erreichten vollkommenen Elasticität, pflegen keine gleichbleibenden Werthe zu sein. Sie verändern sich vielmehr in sehr vielen Fällen mit der Höhe- lage der zu ihrer Ermittlung angewendeten Anspannungsgrenzen.

<sup>1)</sup> Aehnliche Bilder gab vor kurzem Pralon (L 102, Tome III S. 77—101).



Da man diesen Thatsachen in Zukunft mehr Beachtung wird zuwenden müssen, so möchte ich hier unter gleichzeitigem Hinweis auf die oben bereits genannten Quellen einen Versuch mit Lederriemen anführen, wie ihn meine Schüler in den Uebungen auszuführen pflegen. Ich gebe das Protokoll Tab. 26 und das

Tabelle 26. Prüfung eines Lederriemens auf seine elastischen Eigenschaften.

σ at	ε · 10 <sup>-4</sup>	Unterschiede für		a'' · 10 <sup>-6</sup> $\frac{\Delta \varepsilon''}{\Delta \sigma}$	σ at	ε · 10 <sup>-4</sup>	Unterschiede für		a'' · 10 <sup>-6</sup> $\frac{\Delta \varepsilon''}{\Delta \sigma}$	σ at	ε · 10 <sup>-4</sup>	Unterschiede für		a'' · 10 <sup>-6</sup> $\frac{\Delta \varepsilon''}{\Delta \sigma}$
		Belastig. Δε''	Entlastig. Δε'				Belastig. Δε''	Entlastig. Δε'				Belastig. Δε''	Entlastig. Δε'	
5	0	—	—	—	15	132	—	—	—	25	221	—	—	—
15	122	122	—	—	25	215	83	—	—	50	383	162	—	—
5	53	—	69	—	15	169	—	46	—	25	287	—	96	—
15	129	76	—	—	25	218	49	—	—	50	387	100	—	—
5	58	—	71	—	15	172	—	46	—	25	292	—	95	—
15	136	78	—	—	25	220	48	—	—	50	389	97	—	—
5	58	—	78	—	15	173	—	47	—	25	295	—	94	—
15	135	77	—	—	25	221	48	—	—	50	392	97	—	—
5	62	—	73	—	—	—	—	—	—	25	300	—	92	—
15	134	72	—	—	—	—	—	—	—	50	393	93	—	—
5	60	—	74	—	—	—	—	—	—	25	303	—	90	—
15	136	76	—	—	—	—	—	—	—	5	142	161	—	—
5	63	—	73	—	—	—	—	—	—	5 <sup>1)</sup>	142	6	—	—
15	136	73	—	—	—	—	—	—	—	1) Nach 1 Minute abgelesen.				
5	66	—	70	—	—	—	—	—	—					
15	137	71	—	—	—	—	—	—	—					
5	64	—	73	—	—	—	—	—	—					
Δσ = 10 at; Δε'' = 73; ε' = 64				730	Δσ = 10 at; Δε'' = 47; ε = 41				470	Δσ = 25 at; Δε'' = 93; ε' = 82				372

Geprüft am 12. December 1896 (nach nochmals 7 Tagen Ruhe).

5	41	—	—	—	15	161	—	—	—	25	251	—	—	—
15	158	117	—	—	25	243	82	—	—	50	403	152	—	—
5	73	—	85	—	15	191	—	52	—	25	303	—	100	—
15	159	86	—	—	25	247	56	—	—	50	407	104	—	—
5	74	—	85	—	15	196	—	51	—	25	309	—	98	—
15	161	87	—	—	25	249	53	—	—	50	412	103	—	—
5	74	—	87	—	15	200	—	49	—	25	309	—	103	—
—	—	—	—	—	25	250	0	—	—	50	411	102	—	—
—	—	—	—	—	15	200	—	50	—	5	134	—	277	—
Δσ = 10 at; Δε'' = 86; ε' = 33				860	Δσ = 10 at; Δε'' = 51; ε' = 39				510	Δσ = 25 at; Δε'' = 103; ε' = 58				412

Schaubild Fig. 221, indem ich wegen der Bedeutung des Versuchs für die Fragen des Riemenbetriebes auf Bach (*L 137. 181*) verweise.

Die Versuche sind mit einem Riemenstück ausgeführt worden, das vor 560 Tagen bereits einmal bis zum Zerreißen geprüft worden war. Das Stück Kernleder von  $0,8 \times 10,0 = 8,00$  qm Querschnittsfläche und  $0,75$  kg/m Gewicht [Raumgewicht  $r = 0,94$  gr/ccm] wurde, mit Marken im Abstände  $l = 100$  cm versehen, am 5. und 12. December 1896 geprüft. Es ergab dann die in Tab. 26 niedergelegten Werthe.

In Fig. 221 beziehen sich die ausgezogenen Linien auf den ersten, die punktierten auf den zweiten nach 7 Tagen Ruhepause ausgeführten Versuch. Die zwischen den feinen Linien liegenden schraffirten Flächen geben das Feld an, innerhalb dessen die Formänderungen bei wiederholten Belastungen verlaufen.

Aus der Veränderung der Neigungen dieser Felder mit wachsender Spannung und aus dem Verlauf der beiden Linien für  $a''$  erkennt man den Gang der Aenderungen der Dehnungszahl  $a$  für den rein elastischen Zustand; sie wird kleiner mit wachsender Spannung und verändert sich bei Wiederholung des Versuches nach voraufgegangerer Ruhe.

Auch die längst bekannten und vielfach gut beobachteten Veränderungen, die viele Metalle beim kalten Bearbeiten, z. B. beim Drahtziehen, Kaltwalzen, Hämmern u. s. w. erfahren, kann man schliesslich mit zu den in diesem Abschnitt besprochenen Eigenschaftsänderungen zählen, denn die Eigenschaftsänderungen erstrecken sich in den genannten Fällen ganz besonders auf die Elasticitäts- und auf die Streckgrenze.

### 3. Arten und Ausführung des Wöhlerschen Dauerversuches.

**315.** Wenn auch die Beschreibung der Dauerversuchsmaschinen für später vorbehalten bleiben soll, so wird es doch zweckmässig sein, die Konstruktionsgrundsätze, besonders der Wöhlerschen Maschinen, schon an dieser Stelle kurz anzugeben, um das Verständniss zu erleichtern; man wird dann spätere Beschreibungen kürzen können.

Bei den Dauerversuchen kann man die gleichen Hauptbestandtheile unterscheiden, wie bei den Festigkeitsprobirmaschinen (62); es werden hier die gleichen Bezeichnungsweisen benutzt.

**316.** Für Zugbeanspruchung konstruirte Wöhler seine Maschine nach dem in Fig. 222 schematisch gegebenen Grundsatz. Die Kraftmessung

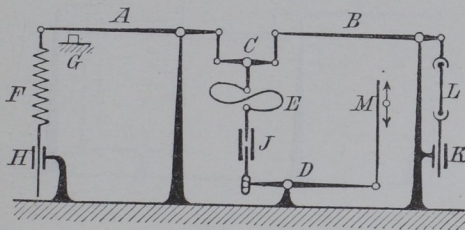


Fig. 222.

erfolgt durch die Feder  $F$ , die auf den Hebel  $A$  wirkend, diesen auf den Anschlag  $G$  niederzieht. Durch die Schraube  $H$  kann man der Feder eine bestimmte Spannung ertheilen. Der Hebel  $A$  steht durch den Zwischenhebel  $C$  mit dem Hebel  $B$  durch Gehänge in Verbindung. Der Hebel  $B$  trägt die Einspannvorrichtung für den Probestab  $L$ , der in der Verschraubung  $K$  sein Widerlager am Maschinengestell findet. Der Antrieb geschieht von der Wellenleitung des Arbeitsraumes aus vermittelt eine excentrische Scheibe, die die Zugstange  $M$  auf und nieder bewegt. Der Hebel  $D$  überträgt diese Bewegung durch die Verschraubung  $J$  und Feder  $E$  auf das Zwischenstück  $C$ .

Wenn nun die Feder  $E$  durch den Hebel  $D$  gespannt wird, so wird sie in den Gehängen von  $C$  Kräfte erzeugen, die gleich der halben Anspannung der Feder  $E$  sind. Durch Regelung der Verschraubung  $J$  wird die Spannung in  $E$  allmählig gesteigert, bis die auf den Hebel  $A$  wirkende Theilkraft im Stande ist, den Hebel gerade von dem Anschlag  $G$  abzuheben. In diesem Augenblick hat diese Theilkraft genau den Betrag, der ihr durch die Messfeder  $F$  zugewiesen werden soll. Die am anderen Ende von  $C$



wirkende Theilkraft hat gleiche Grösse, weil beide Arme von  $C$  gleich lang sind. Diese Kraft wird nun durch den Hebel  $B$  zehnmal vergrössert auf den Probestab übertragen, dessen grösste Spannung somit von der Regelung der Feder  $F$  abhängig ist.

Der Hebel  $D$  gewährt im Angriffspunkte des Gestänges zur Feder  $E$  einen Spielraum, derart, dass nach der völligen Entlastung der Feder  $E$  der Hebel  $D$  immer noch einen kleinen Weg durchlaufen kann, ohne eine Kraft nach oben abzugeben.  $E$  nimmt in diesem Falle also gewissermassen die Rolle eines starren Zwischengliedes an; der Probestab erfährt bei jedem Auf- und Niedergang von  $D$  einen Spannungswechsel zwischen Null und dem von  $F$  vorgeschriebenen grössten Betrage.

Wird aber durch Regelung der Verschraubung  $J$  die Feder  $E$  bei der Anfangslage des Hebels  $D$  in Spannung versetzt, so wird auch in dieser Anfangslage im Probestabe  $L$  noch die entsprechende Spannung verbleiben und der Spannungswechsel erfolgt nunmehr zwischen einer bestimmten unteren und oberen Grenze. Auch die untere Grenze wird, wie man sah, vermittelt der Messfeder  $F$  geregelt.

**317.** Seine Maschine für Biegungsbeanspruchung konstruirte Wöhler nach dem gleichen Grundsatz, wie folgt. Die Kraftmessvorrichtung und die Art ihrer Wirkung bleibt die gleiche; der Probestab  $L$  (Fig. 223)

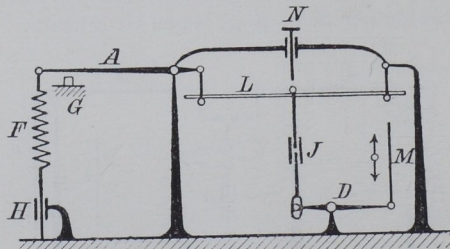


Fig. 223.

tritt an die Stelle des Hebels  $C$ . Die Verschraubung  $J$  wird so lange nachgestellt, bis der Hebel  $A$  durch den von  $M$  ausgeübten Zug gerade zum Abheben gebracht wird. Die Feder  $F$  regelt in diesem Falle also den Widerlagerdruck von  $L$  und damit die Höchstspannung im Stabe. Soll die Spannung zwischen einer bestimmten unteren und oberen Grenze schwanken, so stellt man mittelst  $F$  zunächst den der unteren Spannungsgrenze entsprechenden Auflagerdruck an  $L$  her und schraubt dann, nach Erzeugung der betreffenden Spannung und Durchbiegung im Stabe, die Schraube  $N$  so tief nieder, dass der Stab die erzeugte Durchbiegung nicht wieder aufgeben kann, auch wenn der Hebel  $D$  ganz entlastet wird. Hierauf wird durch Verlängerung von  $F$  der der Höchstspannung entsprechende Widerlagerdruck eingestellt und dann durch Nachspannen von  $J$  dafür Sorge getragen, dass bei jedem Hub der Hebel  $A$  gerade von  $G$  abgehoben wird.

**318.** Bei den Maschinen für Biegung in allen durch die Stabaxe gelegten Ebenen traf Wöhler die Einrichtungen so, dass der Stab  $L$  (Fig. 224) ganz fest in die mittelst Schnurscheibe  $S$  in ihren Lagern  $AB$  gedrehte Welle  $W$  eingefügt wird. Der Probestab  $L$  wird durch die am Stabende

angreifende Feder  $F$  in eine bestimmte Biegungsspannung versetzt. Alle ausserhalb der neutralen Mittelfaser gelegenen Fasern erfahren bei jeder vollen Umdrehung wechselnde Zug- und Druckspannungen. Bei dieser Art

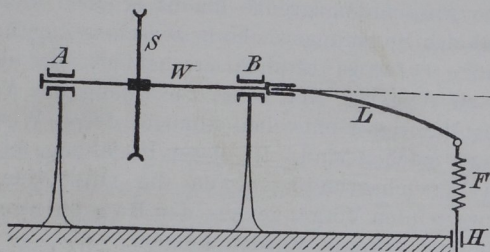


Fig. 224.

der Inanspruchnahme herrschen die grössten Spannungen nur im gefährlichen Querschnitt, also am Uebergang zur Einspannung.

**319.** Die Wöhlersche Maschine zur Ausführung der Dauerversuche auf Verdrehung hat folgenden Konstruktionsgrundsatz, Fig. 225. Sie ist sowohl für rechts, als auch für links drehende Momente eingerichtet, und man kann auch beide abwechselnd wirken lassen. Die Kraftmessung geschieht, wie früher, durch die Federn  $F$  und  $F_1$ . Der Probestab ist in  $L$  senkrecht zur Ebene der Zeichnung angebracht und an dem einen Ende mit dem Doppelarme  $BB_1$ , an dem andern mit dem Antriebshebel  $D$  fest verbunden. Bei der Bewegung von  $D$  legt sich die Nachstellschraube  $N$  oder  $N_1$  auf das Ende des Hebels  $A$  oder  $A_1$  und bringt ihn zum Abheben

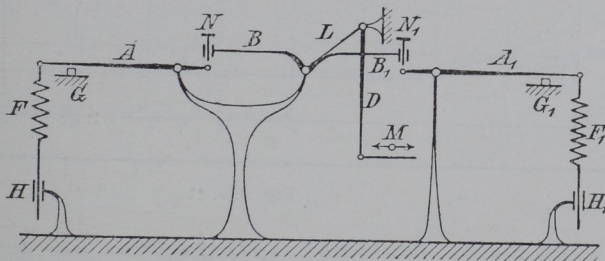


Fig. 225.

von  $G$  oder  $G_1$ . Hierdurch wird ein bestimmt bemessenes Drehmoment erzeugt. Sollen abwechselnd rechts und links drehende Momente benutzt werden, so stellt man beide Schrauben  $N$  und  $N_1$  so ein, dass bei jedem Doppelhube von  $D$  die beiden Hebel  $A$  und  $A_1$  gerade von  $G$  und  $G_1$  abgehoben werden.

#### 4. Ergebnisse der Wöhlerschen Versuche.

**320.** Wenn die Bauschingerschen Gesetze auch noch des weiteren Ausbaues und der Bestätigung ihrer allgemeinen Gültigkeit bedürfen, so haben sie doch den Weg zum Verständniss der Vorgänge bei den Dauerversuchen bereits eröffnet.

Nach dem Gesetz  $k$  (314) kann man erwarten, dass ein Körper un-



zählige Anstrengungen zwischen Null und einer oberen Grenze vertragen wird, wenn diese obere Grenze so bemessen wurde, dass sich infolge der wiederholten Anspannungen die  $P$ -Grenze von ihrer ursprünglichen Lage bis über die obere Anspannungsgrenze hinaus erheben kann.

Für den Fall des Spannungswechsels zwischen Zug und Druck lassen die Gesetze  $n$  und  $o$  (314) es rätlich erscheinen, die obere Spannungsgrenze allmählich zu steigern, weil sonst zu Anfang des Versuches Ueberanstrengungen des Materiales entstehen können, deren Wirkungen nachher nicht wieder gut zu machen sind. In dieser Beziehung fehlt es aber noch an ausreichenden Versuchsgrundlagen, da die unter den ebengenannten Umständen zu erwartenden Vorgänge aus den Bauschingerschen Gesetzen noch nicht erschöpfend erkannt werden können.

**321.** Die Aufgabe der Dauerversuche ist es, für verschiedene Arten der Inanspruchnahme und für alle wichtigen Konstruktions-

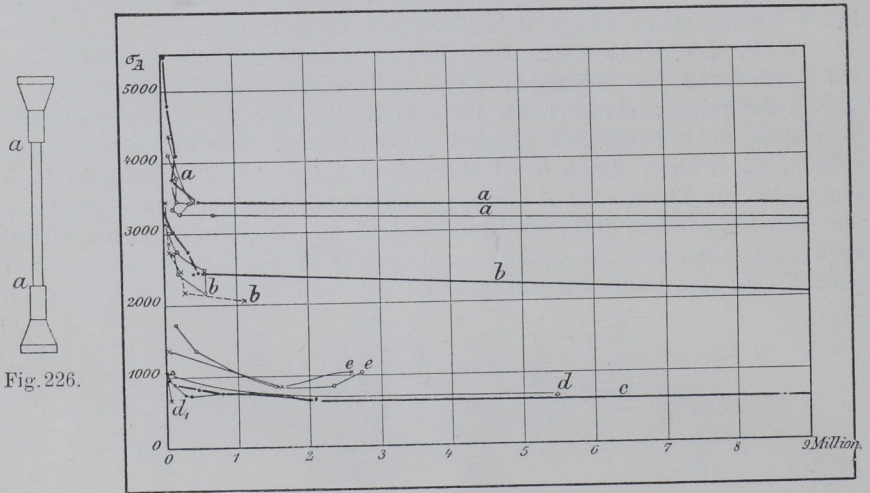


Fig. 226.

Fig. 227.

materialien diejenige Spannung aufzusuchen, die letztere ertragen können, ohne dass durch eine sehr grosse Zahl von Anspannungen der Bruch herbeigeführt wird. Diese Spannung wurde (312) die Arbeitsfestigkeit  $\sigma_N$  des Materiales für die betreffende Beanspruchungsart genannt.

Wöhler hat versucht, diese Spannungsgrenzen unmittelbar durch den Dauerversuch festzustellen. Zu dem Zweck hat er Stäbe aus gleichem Material und von gleicher Form mit verschiedenen Anspannungsgrenzen geprüft und die Zahl  $n$  der Anspannungen festgestellt, die von seinen Stäben bis zum Bruch vertragen wurden. Aus den Ergebnissen dieser Versuche lassen sich Schaulinien ableiten, deren Verlauf gesetzmässig ist, und aus denen man dann leicht die Grenzspannungen, d. h. die Arbeitsfestigkeiten erkennen kann. Es wird aus den in Abs. 310 angegebenen Gründen genügen, hier den allgemeinen Charakter und die grossen Züge der Ergebnisse mitzutheilen; ich benutze hierbei im Wesentlichen die Versuchsreihen von Wöhler und Spangenberg (L. 174, 175).

**322.** Für die Zugversuche (316, Fig. 222) wandten Wöhler und Spangenberg Stäbe von der in Fig. 226 dargestellten Form an, bei denen die Uebergänge an den Ecken  $a$  entweder durch eine Hohlkehle oder unvermittelt, scharf unter rechtem Winkel stattfanden. In Fig. 227 giebt Gruppe  $a$  die Zahl  $n$  der Anspannungen an, die angewendet werden mussten, um einen auf Zug zwischen den Grenzen Null und  $+\sigma_A$  beanspruchten Stab obiger Form zum Bruch zu bringen. Die Zahl  $n$  der Anspannungen  $\sigma_A$  nimmt mit fallendem  $\sigma_A$  zu; die durch die beobachteten Werthe gelegte Ausgleichlinie fällt also und berührt die Gerade  $\sigma_N$ , Fig. 228, asymptotisch. Diese Gerade entspricht derjenigen Spannung  $\sigma_N$ , durch welche kein Bruch mehr erzeugt wird, d. h. der Arbeitsfestigkeit des Materiales bei oft wiederholter Zugbeanspruchung zwischen 0 und  $+\sigma_N$ .

Die Arbeitsfestigkeit für Zugbeanspruchung unter den genannten Umständen kann man für die untersuchten Materialien wie folgt annehmen:

- A) Zugbeanspruchung; Stäbe mit Hohlkehle
- |                            |                          |                   |
|----------------------------|--------------------------|-------------------|
| a) Gussstahl               | $\sigma_N = 3000$ at     | } siehe Fig. 227. |
| b) Eisen                   | " = 2000 at              |                   |
| c) Gusseisen und d) Bronze | " = 600 at               |                   |
| e) Phosphorbronze          | " = 700 at <sup>1)</sup> |                   |

**323.** Einen ganz ähnlichen Verlauf würden die Linien zeigen, welche die Zahl der Anspannungen darstellen, die auf Biegung (317, Fig. 223) zwischen Null und  $\sigma_A$  beanspruchte Stäbe bei abnehmenden Werthen für  $\sigma_A$  bis zum Bruch ertragen. Auch hier findet sich aus den Versuchen die Assymptote  $\sigma_N$  in gleicher Weise, wie in Fig. 228 dargestellt.

Die Arbeitsfestigkeit für Biegungsbeanspruchung

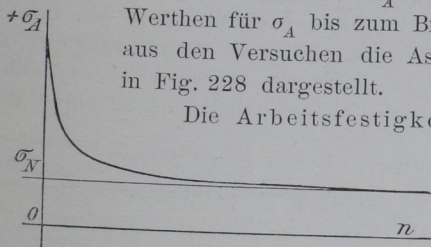


Fig. 228.

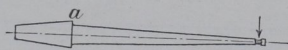


Fig. 229.

unter den genannten Umständen kann man nach den Versuchsergebnissen für die untersuchten Materialien etwa wie folgt annehmen:

- B) Biegungsbeanspruchung
- |              |                      |
|--------------|----------------------|
| a) Gussstahl | $\sigma_N = 3300$ at |
| b) Eisen     | " = 2300 at          |
| c) Bronze    | " = 800 at           |

Auch für den Fall, dass die Stäbe auf Durchbiegung unter gleichzeitiger Drehung des Stabes, also zwischen  $+\sigma_A$  und  $-\sigma_A$ , wechselnd, geprüft werden (318 Fig. 224) haben die Schaulinien einen ähnlichen Verlauf wie in Fig. 228. Unter diesen Umständen und bei der in Fig. 229 gezeichneten Stabform [bei  $a$  Hohlkehle oder scharfer Uebergang], beträgt die Arbeitsfestigkeit der untersuchten Materialien etwa:

<sup>1)</sup> Diese Werthe können selbstverständlich nicht verallgemeinert werden, zumal der Materialcharakter im Laufe der Jahrzehnte ein ganz anderer geworden ist, als er den von Wöhler und Spangenberg benutzten Stäben entsprach.



C) Biegung nach allen Seiten, Stäbe mit Hohlkehle

- a) Gussstahl  $\sigma_N = 1800$  at  
 b) Eisen „ = 1300 at  
 c) Kupfer „ = 800 at.

**324.** Eine wesentlich höhere Anspannung  $\sigma_A$  kann das gleiche Material vertragen, wenn man die Spannung nicht auf Null zurückgehen, sondern die Anspannung  $\sigma_A$  zwischen einem Minimum und Maximum schwingen lässt. Die Ergebnisse solcher Versuche lassen sich für Biegungs-

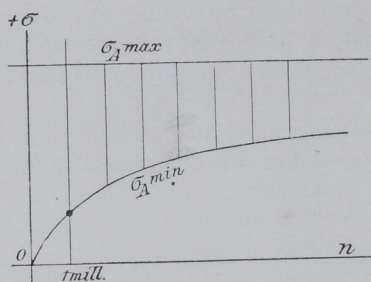


Fig. 230.

beanspruchung (317, Fig. 233) in der in Fig. 230 dargestellten Weise veranschaulichen. Die Linienzüge geben die Anzahl der Anspannungen  $n$  bis zum Bruch an, die das Material verträgt, wenn man es zwischen der durch die Ordinaten des Linienzuges  $\sigma_{A \max}$  gegebenen oberen Grenze und einer durch die Ordinaten des Linienzuges  $\sigma_{A \min}$  angegebenen unteren Grenze schwingen lässt; die Abscisse giebt die Zahl  $n$  der Anspannungen an, die den Bruch herbeiführen.

Entnimmt man unter Zuhilfenahme einer solchen Darstellung aus den Wöhler-Spangenberg'schen Versuchen nach ungefährender Schätzung diejenigen Spannungsgrenzen, die nach 1 Million Anspannungen den Bruch bei ungehärtetem Federstahl herbeiführten, sowie die Spannungsgrenzen, bei denen ein Bruch überhaupt nicht mehr zu erwarten ist, für die also  $n = \infty$  wird, so kann man folgende kleine Tabelle niederschreiben:

E) Biegungsbeanspruchung zwischen den Grenzen.

a) obere	} $\sigma_A$	max at	4000	4790	5470	6150	6840
untere		min at	0	1300	2200	3300	4100
für Bruch nach $n = 1$ Million							
Unterschied $\sigma_{\max} - \sigma_{\min}$ at			4000	3490	3270	2850	2740
b) untere $\sigma_A$		min at	0	1500	2500	3800	4500
für Bruch nach $n = \infty$							
Unterschied $\sigma_{\max} - \sigma_{\min}$ at			3700 <sup>1)</sup>	3290	2970	2350	2340

Aus diesen Zahlen geht hervor, dass nicht allein die Höhe der Maximalanspannung für die Widerstandsfähigkeit des Materiales gegen oft wiederholte Anspannung maassgebend ist, sondern dass hierbei ganz besonders auch die Grösse der Schwingung, die Amplitude, in Frage kommt. Je höher die obere Grenze der

1) Obere Grenze für  $\sigma_{\min} = 0$  war  $\sigma_{\max} = 3700$  at.

Anspannung heraufrückt, desto kleiner muss der Schwingungsaussschlag werden, wenn nicht durch oft wiederholte Beanspruchung der Bruch erzeugt werden soll. Die Grenze für  $\sigma_{\min}$  muss schneller wachsen als diejenige für  $\sigma_{\max}$ .

Wöhler hat bei seinen Dauerversuchen ganz besonders auch die Verderblichkeit der scharfen Uebergänge von einem Querschnitt eines Konstruktionstheils zum anderen erwiesen und so eine alte Erfahrung des Maschinenbaues zahlenmässig bestätigt.

Die Wöhlerschen Erfahrungen über die Wirkung der scharfen Ansätze kommen in folgenden Zahlen zum Ausdruck.

Bei den Versuchen auf Biegung unter Umdrehung der Stäbe um ihre Axe (323) ergaben die aus einer Eisenbahnaxe geschnittenen gleichen Stäbe, von denen ein Theil scharf abgesetzt, der andere mit Hohlkehle versehen war:

a) Eisen, Stäbe mit Hohlkehle  $\sigma_N = 1300$  at,

b) „ Stäbe scharf abgesetzt „ = 1000 at,

die Arbeitsfestigkeiten in den Fällen a und b verhalten sich also wie 100:77.

Auch für Zugfestigkeit hat Wöhler die Schädlichkeit der scharfen Uebergänge erwiesen. Er fand die Anzahl  $n$  der zum Bruch führenden Anspannungen für

a) Stahl, bei  $\sigma_A = 3130$  at  $n = 13,6$  Mill. Hohlkehle

„ = 2050 at  $n = \infty$  „ scharf abgesetzt

b) Eisen, bei  $\sigma_A = 2460$  at  $n = 0,41$  „ Hohlkehle

„ = 2460 at  $n = 0,04$  „ scharf abgesetzt

also, wenn man die in Vergleich gestellten Zahlen als nahezu unter gleichen Umständen gefunden gelten lässt, eine erhebliche Verminderung des Sicherheitsgrades durch den scharfen Ansatz.

Hier ist es nothwendig, nochmals auf den Gegensatz zu den früher besprochenen Erfahrungen zu verweisen. Aus Absatz 99 bis 104. S. 59—65 ergab sich, dass wegen ihrer Wirkung als Stabköpfe, die scharfen Ansätze eine Erhöhung der Festigkeit zur Folge haben und zwar konnte bei den Zugversuchen mit Schraubenbolzen (S. 64) eine Erhöhung von fast 20% nachgewiesen werden. Wie sich hier aus den Wöhlerschen Versuchen ergibt und aus der Erfahrung von Alters her bekannt ist, bedeutet aber diese Erhöhung der Festigkeit noch keineswegs eine Erhöhung des Sicherheitsgrades des Konstruktionstheiles, an dem der scharfe Ansatz vorhanden; vielmehr erscheint der Sicherheitsgrad an dieser Absatzstelle ganz erheblich verringert; in welchem Maasse dies geschieht, darüber geben die Zahlen des vorigen Absatzes genügend Auskunft. Der Grund der Sicherheitsverminderung scheint mir aber der gleiche zu sein, den man früher (100 bis 103) für die Festigkeitserhöhung in Anspruch nahm. Die Festigkeitserhöhung tritt ein, weil die Formänderungsfähigkeit im gefährlichen Querschnitt durch die scharfen Uebergänge vermindert wird. Aus gleichem Grunde ist aber in den scharfen Uebergängen die Arbeitsfähigkeit vermindert. Die Formänderungen [Längen- und Querschnittsänderungen] erstrecken sich bei allmählichem Uebergang auf eine verhältnissmässig grössere Materialmenge, als bei scharfem Uebergang; das Arbeitsvermögen der Raumeinheit wird also im gefährlichen Querschnitt in geringerem Maasse in Anspruch genommen, wenn allmähliche Uebergänge vorhanden sind.

## 5. Neuere Dauerversuche.

325. Bei der in Absatz 318 Fig. 224 beschriebenen Wöhlerschen Dauerversuchsmaschine für wechselnde Biegung in verschiedenen Ebenen [Biegung unter Umdrehung des Stabes] wird der Stab nur in



dem gefährlichen Querschnitt neben der Einspannstelle voll beansprucht. Die nach den Bauschingerschen Gesetzen (314) zu erwartenden Aenderungen der Materialeigenschaften und die etwaigen von der Arbeitsleistung des Materiales abhängigen Aenderungen seines Gefüges und seiner physikalischen Eigenschaften gehen also vorwiegend nur in einer kleinen Stabstrecke vor sich.

Um die grösste Spannung über eine grössere Länge gleichmässig zu vertheilen und hierdurch die Möglichkeit zu gewinnen, die während des Dauerversuches im Material vorgegangenen Veränderungen besser feststellen zu können, konstruirte ich im Jahre 1885 für die Charlottenburger Versuchsanstalt eine Maschine nach dem Schema Fig. 231 derart, dass der Stab  $L$  die ganze Länge  $aa_1$  hat und in den Lagern  $A$  und  $A_1$  drehbar, aber derart beweglich gelagert ist, dass die Lager den Biegungen des mittleren Stabtheiles folgen können. Beanspruchen ihn unter diesen Umständen an den beiden gleich langen Hebeln  $Aa$  und  $A_1a_1$  gleiche Kräfte  $F$  und  $F_1$ , so erfährt der Stab in der ganzen Länge bei gleichbleibendem Querschnitt eine gleichmässige Beanspruchung.

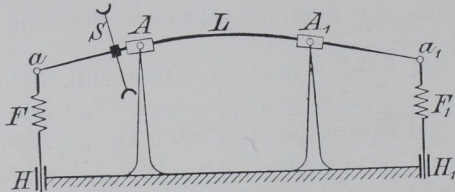


Fig. 231.

Alle im Material wegen der oft wiederholten Anspannungen durch wechselnde Zug- und Druckspannung auftretenden Aenderungen müssen sich nun auf den ganzen prismatischen Stabtheil zwischen  $A$  und  $A_1$  gleichmässig erstrecken. Sie werden sich also durch eine nachträgliche sorgfältige Festigkeitsprüfung in der Zerreiissmaschine besser bemerkbar machen müssen, als es bei der vorher beschriebenen Anordnung möglich war.

Um den Zerreiissversuch schnell und bequem durchführen zu können, ist der Theil des Stabes zwischen  $AA_1$  so geformt, dass der Stab nach dem Abschneiden der Enden  $Aa$  und  $A_1a_1$  einen Normalrundstab von 2,0 cm Durchmesser liefert.

Der Versuch selbst wird so angeordnet, dass aus einem grossen gewalzten Block neben einander eine Reihe von Probestäben entnommen wird. Einer dieser Stäbe wird mit einer Spannung, die über die Arbeitsfestigkeit des Materiales sehr wahrscheinlich hinausgeht, in die Maschine gebracht und so lange gedreht, bis der Bruch erfolgt.

Da die Arbeitsfestigkeit sich durch den Versuch nur auf sehr langwierigem Wege feststellen lässt, so mussten die anzuwendenden Arbeitsfestigkeiten in Wirklichkeit bei den Versuchen geschätzt werden. Bei dem sehr verschiedenen Charakter des zur Verfügung stehenden Materiales waren diese Schätzungen mit vielfachen Missgriffen verbunden, so dass die noch immer nicht abgeschlossenen Versuche einen sehr viel grösseren Zeitraum in Anspruch nehmen werden, als ursprünglich vorgesehen wurde. Ein Beweis, wie mir scheint, dass die Dauerversuche noch erheblich ausgedehnt werden sollten, da die Ergebnisse in so hohem Maasse vom Charakter des Materiales abhängen (*L 110*, S. 136).

Nach erfolgtem Bruch des ersten Stabes werden die Schwesterstücke

in die Maschine gelegt und bei gleicher Anspannung mit  $\frac{1}{5}$ ,  $\frac{2}{5}$ ,  $\frac{3}{5}$ ,  $\frac{4}{5}$  der zum Bruch erforderlichen Umdrehungen beansprucht. Hierauf werden die Enden der Stäbe abgeschnitten und die Stäbe auf der Festigkeitsprobiermaschine geprüft. Die so gewonnenen Ergebnisse werden mit den Ergebnissen von Normalrundstäben aus unbeeinflusstem Material des gleichen Blockes verglichen. Ausser diesen Prüfungen werden noch mikroskopische Untersuchungen über etwaige Gefügeänderungen infolge der oft wiederholten Anstrengung unternommen.

**326.** Dauerversuche wurden, wie schon angedeutet, auch in England und Amerika mehrfach ausgeführt, so z. B. von Kennedy, Howard u. A. Im Massachusetts Institute of Technology in Boston, Mass., ist beispielsweise eine Maschine ganz ähnlicher Art im Betriebe, wie sie vorhin beschrieben wurde; sie ist nach dem Schema Fig. 232 konstruiert. Gleiche Theile tragen die gleichen Bezeichnungen wie in Fig. 231. Der Stab  $L$  wird durch die Feder  $F$  mittelst des Hebels  $B$  gespannt und mittelst einer eigenartigen federnden Kuppelung durch eine biegsame Wellenleitung in

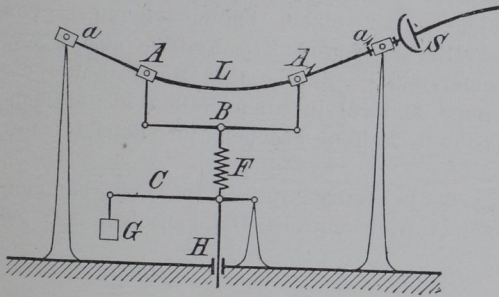


Fig. 232.

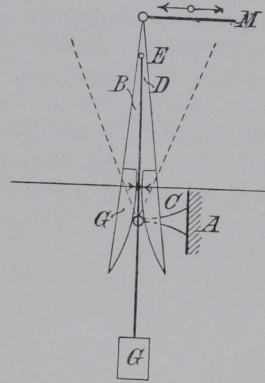


Fig. 233.

der Minute 500 mal umgedreht. Die Spannung der Feder geschieht mittelst des Kontrollgewichtes  $G$  am Hebel  $C$ . Die Feststellung durch die Klemme in  $H$ . Der Antrieb erfolgt durch einen Tag und Nacht laufenden Elektromotor. Von Zeit zu Zeit werden die elastischen Durchbiegungen im Ruhezustande und in verschiedenen Stablagen gemessen.

**327.** Eine Maschine, um Körper gleichzeitig auf Zug- und Biegebungsbeanspruchung zu prüfen, konstruirte ich für die Charlottenburger Versuchsanstalt; ihr Schema ist in Fig. 233 dargestellt. Diese Maschine ist hauptsächlich für die Prüfung von Drähten, Litzen und dünnen Seilen benutzt worden, um Beziehungen zwischen dem Rollendurchmesser und der Seilkonstruktion von Seiltrieben u. s. w. aufzusuchen. Der zu prüfende Draht wird in  $E$  an einem Hebel  $B$  befestigt, der von der Schubstange  $M$  um den Festpunkt  $A$  in schwingende Bewegung versetzt wird. Der mit dem Gewicht  $G$  belastete Draht legt sich bei jeder Schwingung des Hebels gegen die Backen  $CC$ , die nach einem Kreisbogen von bestimmtem Halbmesser geformt sind. Der Draht erfährt also bei jeder Schwingung des Hebels neben seiner Zugbeanspruchung noch Biegebungsbeanspruchungen. Die Lage des Schwingungspunktes  $A$  gegenüber den Kurvenstücken  $C$  wird so gewählt, dass die Seitenbewegungen der Probe möglichst klein ausfallen. Aufgabe des Versuches ist es, die Zahl der Biegungen festzustellen,



die ein Draht, die Litze eines Seiles oder das Seil selbst, bei verschiedener Konstruktion der Proben, um Rollen von bestimmtem Halbmesser bei gleichzeitigen Zugbeanspruchungen vertragen kann. Die Seilscheibendurchmesser müssen so bemessen werden, dass neben grösster Leistungsfähigkeit des Triebwerkes der Seilverbrauch möglichst gering wird.

**328.** Die Beschreibung eines von mir für die Charlottenburger Anstalt konstruirten Fallwerkes, mit welchem Seile und Seilverbindungen auf oft wiederholte Schlagbeanspruchung unter gleichzeitiger Belastung auf Zug geprüft wurden, gab ich bereits in Abschnitt 232 (*L 153*).

**329.** Wöhler hat auch Schlagdauerversuche angestellt, um die Wirkung der Radstösse auf das Material an den Fugen der Schienenköpfe zu studiren. Er liess hierbei auf die Schienenköpfe einen mechanisch angetriebenen Hammer schlagen (*L 157*).

**330.** Eine ähnliche, von H. Meyer konstruirte Maschine hatte die französische Westbahn 1878 in Paris ausgestellt; sie diente dazu um fertig aufgezoogene Radreifen auf dem Radgestell vor der Inbetriebnahme durch eine bestimmte Anzahl von Schlägen mit einem 8 kg schweren Hammer zu probiren (*L 183*, S. 39). Die Bahnverwaltung hatte seit dem Jahre 1875 über 56000 Reifen durch Schlägen mit einem Schmiedehammer von 8 kg Gewicht<sup>1)</sup> probiren lassen. Hierbei waren 243 Reifen, also 2,3% gebrochen, deren Material (Bessemerstahl — das heutige Material und die jetzigen Befestigungsarten sind ganz andere) in allen Fällen als schlecht erkannt wurde. Von den erprobten Reifen brachen im Betriebe nur sehr wenige.

Die Maschine [Schema Fig. 233] besteht aus einem Federhammerwerk *F*, das durch mechanischen Antrieb mittelst Daumenscheibe *D* ge-

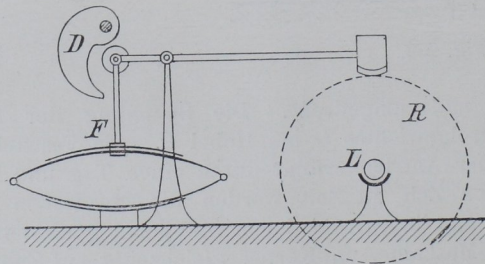


Fig. 234.

spannt wird und 50 bis 60 Schläge in der Minute auf die Reifen des in seinen Lagern *L* unterstützten und langsam gedrehten Radgestelles *R* abgibt. Die Konstruktionszeichnungen sind in der Quelle auf Taf. VII gegeben.

**331.** Dauerversuche, die den Zweck hatten, die Güte verschiedener

<sup>1)</sup> Das zweckmässige Hammergewicht wurde besonders an Versuchsreihen ermittelt, die in der Quelle mitgetheilt sind, indem man mit verschiedenen Schmiedehämmern Stahlkegel in einen Bleiblock eintreiben liess, die bei jedem Schläge erreichte Eindringungstiefe mass, und nun durch fallende Gewichte die gleichen Kegel in das Blei eintreiben liess. Die Fallhöhe wurde so lange geändert, bis man gleiche Eindringetiefen erhielt wie bei den Schlägen aus freier Hand; man gewann aus den hierfür ermittelten Fallarbeiten ein Maass für die von Menschen mit verschiedenen schweren Hämmern geleistete Schlagarbeit.



Radreifenbefestigungen durch den Versuch zu erproben, wurden von Büte (*L 184*) ausgeführt. Bei diesen Versuchen lagerte das fertige Radgestell in seinen Achsbüchsen und wurde unter Druck gegen Scheiben angepresst, welche die Schienen vorstellend, so in Umdrehung versetzt wurden, dass die Geschwindigkeiten des Eisenbahnbetriebes erzielt werden konnten. Die Kränze der Scheiben waren unrund und mit Absätzen versehen, so dass die im Betriebe vorkommenden Stösse, namentlich auch die Seitenstösse, nachgeahmt wurden. Die Konstruktionszeichnung ist in der Quelle angegeben.

**332.** Kürzlich sind in der Versuchsansalt zu Charlottenburg Dauerversuche eingeleitet worden, welche bezwecken, die Arbeitsfestigkeit von Gefässen [Kohlensäureflaschen] mittelst Wasserdruck festzustellen. Bei diesen Versuchen werden Flaschen gleicher Fertigung aus ganz dem gleichen Material unter verschiedenen hohen Anspannungen dem oft wiederholten Wasserdruck ausgesetzt, um diejenige Anspannung aufzufinden, die bei sehr grosser Zahl von Wiederholungen den Bruch nicht mehr herbeiführt. Die Versuche sollen zugleich auch Aufklärung darüber bringen, ob die jetzt vorgeschriebene Wiederholung der amtlichen Druckprobe Gefahr oder Nutzen bringt (*L 185*).

Ganz ähnliche Versuche in noch grösserem Umfange mit Rohrleitungen unter den den hohen Dampfdrucken entsprechenden Hitzegraden sind geplant.

## 6. Brucherscheinungen beim Dauerversuch.

**333.** Wie schon im Absatz *324* erwiesen, tritt der Bruch bei den Dauerversuchen bei einer viel geringeren Anspannung ein, wenn der Stab scharfe Ansätze hat, als wenn er mit Hohlkehlen versehen ist. Es ist aber eine bei den Dauerversuchen allgemein gemachte Erfahrung, dass die Stäbe für Dauerversuche ausserordentlich sauber bearbeitet, ja womöglich polirt sein müssen, wenn nicht irgend eine ganz geringfügig erscheinende Ursache den frühzeitigen Bruch herbeiführen soll. Während beim gewöhnlichen Zugversuch selbst Marken, die rings um den Stab eingerissen sind, sehr selten Anlass zum Bruch an diesen Stellen sind, muss man die Marken zum Ausmessen der Längendehnungen bei Zug-Dauerversuchen sehr vorsichtig anbringen, wenn der Bruch nicht durch sie beschleunigt werden soll. Deswegen werden diese Marken in der Charlottenburger Anstalt meistens als sehr feine Kreuze ausgeführt, deren Schenkel unter  $45^{\circ}$  gegen die Stabaxe geneigt sind.

Findet der Bruch im Querschnitt statt, der die Marken trägt, so wird man immer finden, dass die Bruchlinien von diesen winzigen Fehlstellen ausstrahlen, ein Zeichen, dass diese Stellen in der That den Anlass zum Bruch gaben.

Die Bruchformen und Brucherscheinungen bei Dauerversuchen sind ausserordentlich charakteristisch, so dass man in den allermeisten Fällen mit Sicherheit sagen kann, ob ein vorgelegter Bruch durch plötzliche grosse Ueberanstrengung des Materiales entstanden ist, oder ob viele oft wiederholte kleine Ueberanstrengungen den Bruch herbeiführten. Verschiedene durch den Dauerversuch erzielte Bruchformen sind auf Tafel 2, Fig. 20—23 und 25 abgebildet. Die charakteristischen Eigenschaften sind in Folgendem zu besprechen.



**334.** Man bemerkt an den meisten Abbildungen und weit deutlicher noch an den Probestücken selbst; die früher (122. 210. 276) schon besprochenen Bruchlinien, von einem Punkte ausstrahlend. Der Ausstrahlungspunkt liegt meistens im Umfang des Stabquerschnittes, was erklärlich wird, wenn man bedenkt, dass in den meisten Fällen hier die am stärksten gespannten Fasern liegen [beim Zugversuch (122) ist der Bruchpunkt Ausgang der Strahlung; beim Biegungsversuch (276) und beim Dauerbiegeversuch unter gleichzeitiger Drehung (318. 323) ist das noch ausgesprochenere der Fall; beim Verdrehungsversuch ist die Lage der stärkst gespannten Faser noch abhängig von der Querschnittsform (L 137, § 34)].

Der Ausstrahlungspunkt bildet meistens [die nachfolgende Beschreibung bezieht sich immer auf Flusseisen, wenn nichts anderes gesagt ist] den Mittelpunkt einer elliptisch begrenzten Fläche von sehr feinkörnigem Gefüge, wie in Fig. 235 schematisch angedeutet, an das sich oft mit ganz scharfer



Fig. 235.

Abgrenzung das gröber krystallinische Gefüge anschliesst. Diese elliptische Grenzlinie geht, je nach der Querschnittsform, je nach dem Ort des Strahlungspunktes am Querschnittsumfang und je nach dem Antheil der elliptischen Fläche an der Gesamtquerschnittsfläche, mehr oder minder in die Kreislinie oder die Gerade über.

Die elliptische Fläche bildet sich bei Zugversuchen so gut wie bei Biegungs- und Verdrehungsversuchen aus, nur nimmt bei letzteren die Bruchfläche die schon in der Taf. 2, Fig. 25 und 30 dargestellte charakteristische Form nach Schraubenlinie und Meridianfläche an.

In der elliptischen Fläche bemerkt man häufig concentrisch verlaufende elliptische Ringflächen, deren Begrenzungen dann alle nahezu senkrecht zu den Bruchlinien stehen. Diese Erscheinungen führen ohne weiteres auf diejenigen des muscheligen Bruches über, den sehr viele Körper zeigen, und den man besonders leicht an glasartigen Körpern studiren kann.

**335.** Der muschelige Bruch ist charakterisirt durch wellenförmige, elliptische Ringe, die concentrisch zu einander verlaufend, oft in Gruppen angeordnet sind, Fig. 236. Senkrecht zu den Wellen, oft über Berg und Thal fortlaufend, bemerkt man fast immer mehr oder weniger feine Strahlen. Diese Strahlen werden um so feiner und zahlreicher, je flacher die Wellen werden. Glas zeigt alle diese Erscheinungen ganz besonders charakteristisch, und zufällig gefundene Glassplitter waren es, die zu folgenden Beobachtungen führten.

Mit blossem Auge bemerkt man an den muscheligen Flächen eines solchen Glassplitters leicht die Thatsache, dass, vom Strahlungspunkte ausgehend, die Strahlen (Bruchlinien) sich jedesmal in zwei Aeste zu spalten pflegen, sobald sie über den Rücken einer elliptischen Welle fortschreiten. Diese Spaltungen wiederholen sich fast bei jedem Uebergange, und die Strahlen werden hierbei zuletzt so fein, dass starke mikroskopische Vergrößerung sie erst wieder sichtbar macht. Die Wellen haben in der Nähe des Strahlungspunktes [Ausgangspunkt des Bruches] ihre grösste Tiefe; sie werden immer flacher, je mehr sie sich von ihm entfernen, so dass sie zuletzt ebenfalls nur mit dem Mikroskop an den Formen der Strahlen erkannt werden können. In den tiefen Wellen [in der Nähe des Strahlungs-



punktes] sind die Strahlen nur auf die Wellenthäler beschränkt; sie gehen erst ein wenig später über die Rücken der Berge fort. Fig. 236 [beide untere Bilder] giebt ein Bild von dem Aufbau der Strahlen.

Man bemerkt aus Fig. 236 [unten], dass die Strahlen aus einer steil

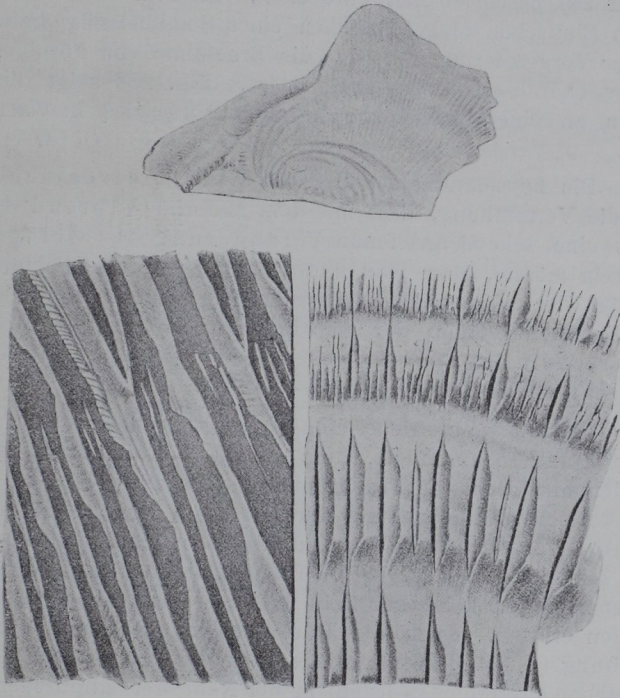


Fig. 236.

und aus einer schwach abfallenden, fast ebenen Fläche gebildet werden; diese Eigenthümlichkeit behalten sie bei, auch wenn sie mikroskopisch klein werden. Die Neigungswinkel beider Flächen scheinen ziemlich gleichbleibend



Fig. 237.

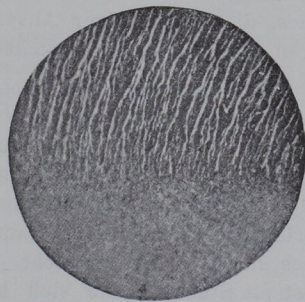


Fig. 238.

zu sein; man sieht daher in den Wellenthälern beide Flächen breiter werden und gegen die Berge sich zuspitzen.

Die Erscheinungen dieser muscheligen Brüche von Glas sind von ganz



ausserordentlicher Regelmässigkeit und erinnern an die Regelmässigkeit der Krystallformen. Man wird sehr leicht die Aehnlichkeiten dieser Erscheinungen mit den früher in den Absätzen 122, 210 und 276 beschriebenen Bruchformen, namentlich mit den bei den Biegungsversuchen (276, Taf. 2, Fig. 27 und 28) beschriebenen entdecken. In Fig. 237 theile ich noch einen durch Einkerbten und Abbrechen eines Stahlmeissels erzielten Bruch in dreifacher Vergrösserung mit, der die Bruchlinie von körnigem Material in besonders charakteristischer Form zeigt. Fig. 238 zeigt die Gabelung der Strahlen an einer Bruchfläche körnigen Materiales in vierfacher Vergrösserung.

**336.** Die Betrachtung der Brüche von Dauerversuchen erweckt gar leicht die Vermuthung, dass mit dem Material während des Dauerversuches eine sehr tiefgreifende Veränderung des Gefüges vor sich gegangen sein müsste, denn man findet das feine, oft sammetartig erscheinende Gefüge der Ellipsenflächen in schroffem Gegensatz zu dem groben, oft krystallinischen Gefüge der sonstigen Bruchfläche. — Und doch ist es unwahrscheinlich, dass wesentliche Gefügeänderungen im Material stattgefunden haben (*L 186*).

**337.** Wenn man ein solches eine möglichst ebene Bruchfläche tragendes Bruchstück [Stahl] so abschleift, dass gerade nur die Brucherscheinungen verschwinden und dann die Bruchflächen polirt und ätzt, so findet man bei mikroskopischer Untersuchung der geätzten Fläche die elliptische Begrenzungslinie nicht wieder, die doch in der Bruchfläche so ausserordentlich scharf erschien (*L 186*). Das Gefüge hat in Folge der wiederholten Anspannungen keine zur Zeit mit dem Mikroskop wahrnehmbaren Aenderungen erlitten. Auch die Härte scheint nach den Versuchen von Spangenberg (*L 175*) [die allerdings nach der in Abs. 348 beschriebenen Einhiemethode ausgeführt wurden] in der Nähe der elliptischen Zone keine andere zu sein, als in der Nähe der krystallinischen. Bauschinger (*L 2*, H. 13, S. 43) zieht aus seinen Versuchen und Beobachtungen ebenfalls den Schluss, dass durch Dauerversuche das Gefüge nicht verändert wird, weil bei Zugversuchen auch solche Stäbe, die eine sehr grosse Zahl von Anspannungen bereits ertragen haben, doch mit allen gewöhnlichen Brucherscheinungen des Zugversuches reissen, während Stäbe ganz gleichen Materiales, die viel weniger Anspannungen aushielten, mit allen Brucherscheinungen des Zug-Dauerversuches reissen.

**338.** Ausser den vorbesprochenen Erfahrungen mahnt aber auch das zum Studium des muscheligen Bruches weiter oben benutzte Vorbild zur Vorsicht bei Rückschlüssen aus dem Bruchaussehen auf das Gefüge des Materiales. Dass im Glase jene überaus regelmässige und gesetzmässige Gefügeanordnung, wie sie in Fig. 236 dargestellt ist, nicht im Material ursprünglich vorhanden ist, kann durch Betrachtung des noch unzerbrochenen Glases im polarisirten Licht mit grosser Schärfe nachgewiesen werden. Selbst an Stücken, die sich hierbei als vollkommen gleichartig und spannungsfrei erweisen, können durch einen einzigen Schlag in kürzester Zeit alle Erscheinungen des muscheligen Bruches erzeugt werden, und man sieht daher klar, dass diese so ausserordentlich regelmässige Anordnung des Bruchgefüges erst im Augenblick des Bruches entsteht, dass sie nur eine Eigenthümlichkeit der Bruchfläche ist und dass ein allein aus dem Bruch-



aussehen abgeleiteter Rückschluss auf Gefügeänderung im Stabe als Folge der oft wiederholten Anstrengungen nicht zulässig ist.

**339.** Die Frage, ob und in welchem Maasse eine sonstige Aenderung der Materialeigenschaften als Folge des Dauerversuches eintritt, kann nur in der früher besprochenen Weise (325) durch wiederholte Untersuchung nach geschehener Anstrengung entschieden werden. Auch Bauschinger hat diesen Weg betreten und sowohl die von ihm aufgestellten, früher (Abschnitt i 2) besprochenen Gesetze als auch seine neueren Versuchsergebnisse lassen eine Veränderung der *P*-Grenze, der Dehnungszahl *a* und der *S*- und *B*-Grenze vermuthen. Leider kann man aus seinen Dauerversuchen (*L* 2, *H*. 13), bei denen die Stäbe mitten im Dauerversuch zur Feststellung der Veränderungen mehrfachen Streckungen ausgesetzt wurden, den Einfluss der Zeit nach dem Strecken auf die Veränderungen (Gesetz *c*, S. 208) der Materialeigenschaften nicht ausscheiden. Diese Aenderungen spielen sich im Stabe, wengleich in anderem Maasse, sicher auch dann ab, wenn der Stab nicht in Ruhe bleibt (Abs. 53), sondern weiter dem Dauerversuch unterworfen wird.

**340.** Auch die Brucherscheinungen bei Dauerversuchen mit nicht gleichmässig gefügten Körpern, z. B. von Schweisseisen u. s. w., sind meistens charakteristisch, indessen würde ihre Aufzählung mehr in eine Sonderabhandlung über die Dauerversuche überhaupt oder über die Eigenschaften bestimmter Materialien gehören. Auf die oben beschriebenen Erscheinungen bin ich hier nur so ausführlich eingegangen, um den inneren gesetzmässigen Zusammenhang aller unter den Absätzen 117—128, 210, 211, 272—276 beschriebenen Brucherscheinungen noch einmal hell zu beleuchten.

## k. Härteprüfung.

**341.** Die Härte eines Materiales ist eine Eigenschaft, die der Maschinenbauer häufig in Anspruch nimmt, die er zuweilen hoch schätzt, wenn er auch nur selten versucht, sie zu messen. Die Technologen haben sich von jeher lebhaft mit dieser Eigenschaft beschäftigt und haben häufig versucht, die Härte der Materialien durch das Maass festzustellen. Die Mineralogen bestimmen regelmässig die Härte ihrer Stoffe. Man sollte also glauben, dass der Begriff der Härte, auch für unsere praktischen Zwecke ausreichend, so vollkommen klar festgestellt sei, wie es z. B. bei der Festigkeit, Elasticität u. s. w. der Fall ist. Aber für keine Eigenschaft der Materialien trifft diese Voraussetzung weniger zu, als auch heute noch für die Härte und die Zähigkeit.

Man hat die Härte zu allen möglichen Eigenschaften in Beziehung gebracht und daher versucht, ihr Maass durch das Maass dieser Eigenschaften auszudrücken. Man findet auf diesem Gebiete in der Literatur sehr viel Unklarheit und sehr stark widerstrebende Anschauungen. Manche Vorstellungsweisen haben sich aber so sehr eingebürgert, dass man sie häufig durcheinander benutzt und für das gleiche Material, je nach den Umständen, einmal den einen, das andere mal den anderen Maassstab anzulegen pflegt, was natürlich zuweilen Verwirrung schafft. Dieser Zustand ist eben nur deshalb möglich, weil es zur Zeit in der Technik noch keine ausreichende und allgemein anerkannte Begriffsfestlegung für die Eigenschaft