

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 σ_A genannt] über ein gewisses, dem Material eigenthümliches Maass hinausgeht. Diese Grenzspannung nannte Launhardt die Arbeitsfestigkeit σ_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 überschreitet¹⁾.

Nennt man diejenige P -Grenze und diejenige S -Grenze, von der wir ausgingen, die ursprüngliche Proportionalitäts- oder Streckgrenze, σ_{Pu} und σ_{Su} , bezeichnet man ferner zur klareren Unterscheidung diejenige Spannung, welche diese Grenzen verändern soll, als die Anspannung σ_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

¹⁾ 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 geschעהener 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 geschעהener

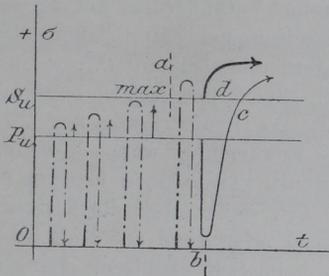


Fig. 208.

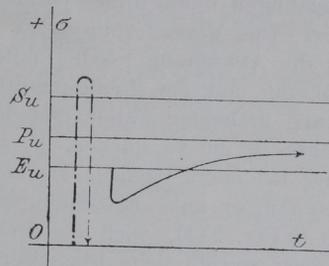


Fig. 209.

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

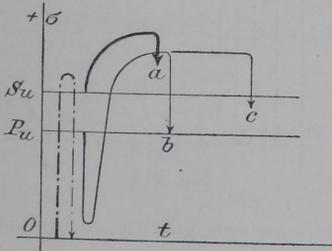


Fig. 210.

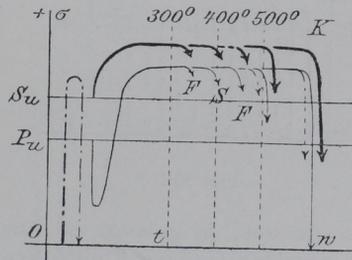


Fig. 211.

Hämmern eine Verlängerung eintritt, so wird die *P*-Grenze nur etwas, aber nicht bis zur ursprünglichen *P*-Grenze erniedrigt¹⁾ (*c* Fig. 210).

g) Wenn durch Anspannung über die ursprüngliche Streckgrenze

¹⁾ 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 C.° ab. Selbst zehnmal wiederholte Erwärmungen unter dieser Grenze rufen keine Veränderung der P -Grenze hervor. Die Veränderung wird beim Flusseisen bei 350 C.° bemerkbar, wenn die Abkühlung rasch [Pfeile ausgezogen] und bei 450 C.° , wenn die Abkühlung langsam [Pfeile punktirt] erfolgt. Bei Schweisseisen beginnt die Wirkung in beiden Fällen erst bei 400 C.° . 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 C.° , sicher aber die Kirschrothgluth (k Fig. 211), wirft die P -Grenze nahezu oder ganz auf Null herab¹⁾ 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 σ 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

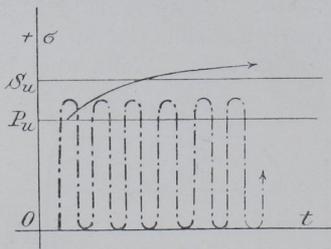


Fig. 212.

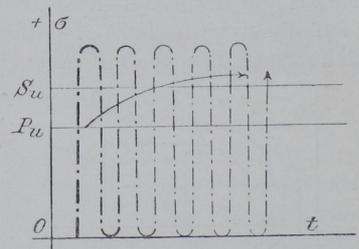


Fig. 213.

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.

¹⁾ 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 σ_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 δ 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 δ 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.

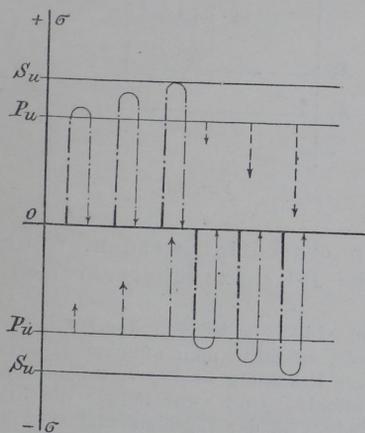


Fig. 214.

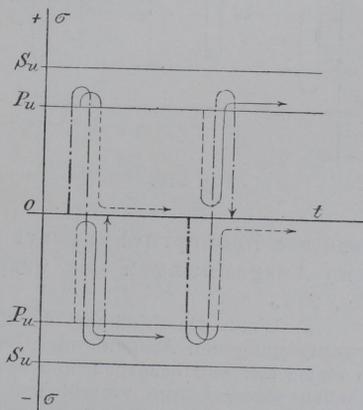


Fig. 215.

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. 216.¹⁾

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

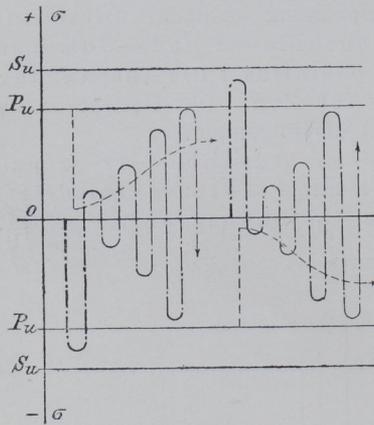


Fig. 216.

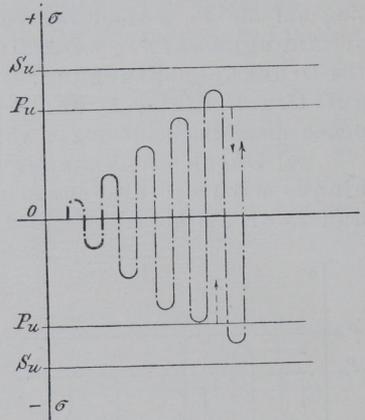


Fig. 217.

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, $l_g = 12,5 \sqrt{f}$ anfertigen

¹⁾ 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 σ_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

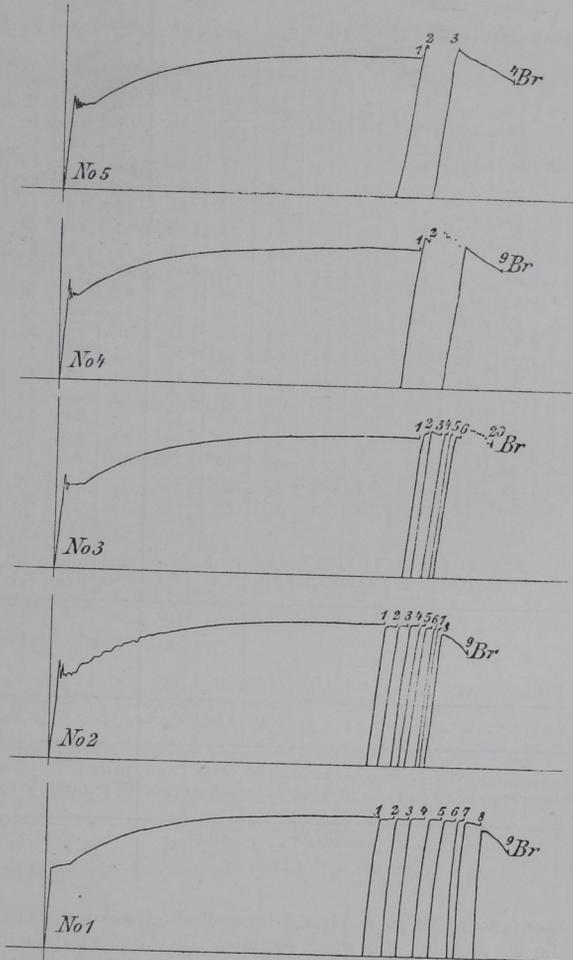


Fig. 218.

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. $f = 3,15 \text{ qem}; \sigma_s = 3270 \text{ at}$ | | | | | | | | | Stab No. 2. $f = 3,17 \text{ qem}; \sigma_s = 3860$ | | | | | | | |
| 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 | — | — | — | — | — | — | — | — |
| Tage | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 7 | 8 |
| 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 |
| | $\delta_{5,6} = 34,0\%$; $\delta_{11,3} = 29,5\%$; $q = 54\%$; $\sigma_B = 5510 \text{ at}$; $\sigma_2 = 5120 \text{ at}$ | | | | | | | | | $\delta_{3,6} = 33,6\%$; $\delta_{10,3} = 29,0\%$; $q = 43$; $\sigma_B = 5650 \text{ at}$; $\sigma_2 = 5340 \text{ at}$ | | | | | | | |

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 hervor¹⁾; 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-

¹⁾ 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 | 22 | 23 | 22 | 22 | 22 | 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 | 17 | 18 | |
| 21 | 20 | 20 | 20 | 20 | 21 | 20 | 20 | 22 | 22 | 23 | 22 | 23 | 23 | 24 | 16 | 18 | 18 | |
| 19 | 20 | 20 | 20 | 21 | 21 | 22 | 21 | 20 | 21 | 20 | 21 | 21 | 20 | 19 | 17 | 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 ¹⁾ | 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,¹⁾ ist es wohl wichtig, die Frage aufzuwerfen, ob der

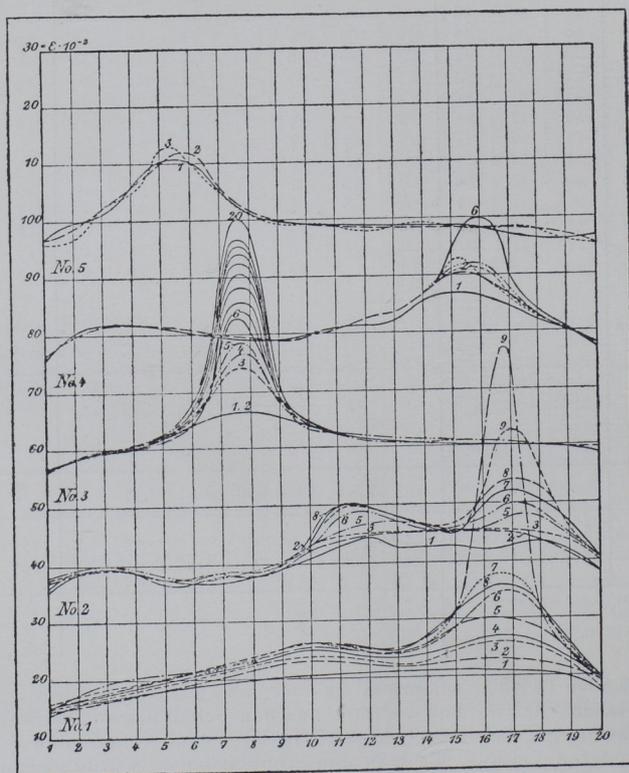


Fig. 220.

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-

¹⁾ 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.¹⁾ 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.

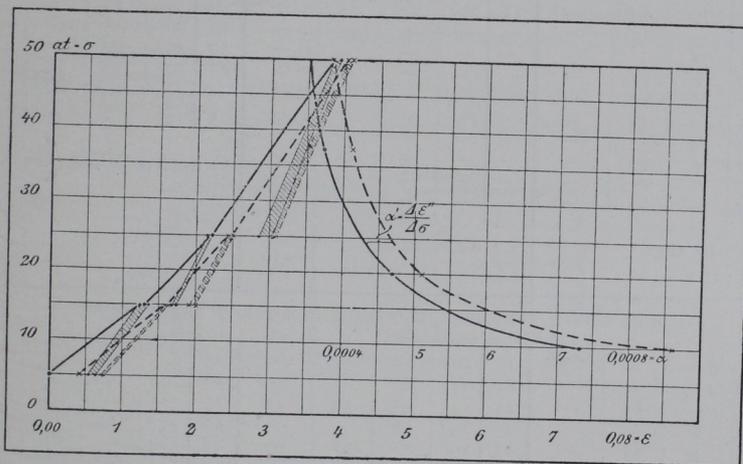


Fig. 221.

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 Aenderungen 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 Höhenlage der zu ihrer Ermittlung angewendeten Anspannungsgrenzen.

¹⁾ 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 ⁻⁴ | Unterschiede für | | a'' · 10 ⁻⁶ $\frac{\Delta \varepsilon''}{\Delta \sigma}$ | σ at | ε · 10 ⁻⁴ | Unterschiede für | | a'' · 10 ⁻⁶ $\frac{\Delta \varepsilon''}{\Delta \sigma}$ | σ at | ε · 10 ⁻⁴ | Unterschiede für | | a'' · 10 ⁻⁶ $\frac{\Delta \varepsilon''}{\Delta \sigma}$ |
|---|----------------------|------------------------------------|------------------------------------|--|--|----------------------|------------------------------------|------------------------------------|--|---|----------------------|------------------------------------|------------------------------------|--|
| | | Belastg. $\Delta \varepsilon''$ | Entlastg. $\Delta \varepsilon'$ | | | | Belastg. $\Delta \varepsilon''$ | Entlastg. $\Delta \varepsilon'$ | | | | Belastg. $\Delta \varepsilon''$ | Entlastg. $\Delta \varepsilon'$ | |
| | | | | | | | | | | | | | | |
| 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 ¹⁾ | 142 | 6 | — | — |
| 15 | 136 | 73 | — | — | — | — | — | — | — | 1) Nach 1 Minute abgelesen. | | | | |
| 5 | 66 | — | 70 | — | — | — | — | — | — | | | | | |
| 15 | 137 | 71 | — | — | — | — | — | — | — | | | | | |
| 5 | 64 | — | 73 | — | — | — | — | — | — | | | | | |
| $\Delta \sigma = 10$ at; $\Delta \varepsilon'' = 73$; $\varepsilon' = 64$ | | | | 730 | $\Delta \sigma = 10$ at; $\Delta \varepsilon'' = 47$; $\varepsilon = 41$ | | | | 470 | $\Delta \sigma = 25$ at; $\Delta \varepsilon'' = 93$; $\varepsilon' = 82$ | | | | 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 | — |
| $\Delta \sigma = 10$ at; $\Delta \varepsilon'' = 86$; $\varepsilon' = 33$ | | | | 860 | $\Delta \sigma = 10$ at; $\Delta \varepsilon'' = 51$; $\varepsilon' = 39$ | | | | 510 | $\Delta \sigma = 25$ at; $\Delta \varepsilon'' = 103$; $\varepsilon' = 58$ | | | | 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 $0,8 \times 10,0 = 8,00$ qcm 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

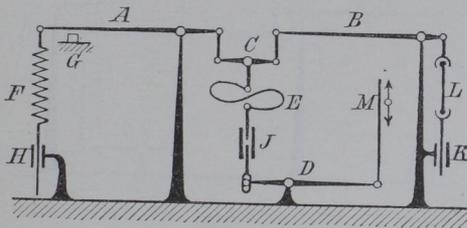


Fig. 222.

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