

Die Graphitbildung wird in starkem Maße durch die Abkühlungsgeschwindigkeit und den Siliziumgehalt beeinflusst, der zwischen 2,5 und 1,0% liegen und um so größer sein muß, je geringer die Wandstärke ist und je rascher die Abkühlung erfolgt. Mangan wirkt in Mengen von mehr als 1% der Ausscheidung des Kohlenstoffs entgegen. Schwefel macht schon bei geringen Beträgen das Eisen dickflüssig (Gehalt < 0,12%); dagegen erhöht Phosphor die Dünflüssigkeit, gleichzeitig aber auch die Härte und Sprödigkeit, so daß wichtige und größeren Kräften ausgesetzte Maschinenteile nicht mehr als 0,8% Phosphor enthalten sollen. Die für den jeweiligen Zweck nach Festigkeit, Härte und Bearbeitbarkeit geeignete Mischung wird durch Gattieren verschiedener Roheisensorten untereinander oder mit Gußeisenschrott, bei hohen Anforderungen mit Stahlabfällen, zweckmäßigerweise auf Grund chemischer Untersuchung der Rohstoffe hergestellt. Zum Schmelzen dienen in den meisten Fällen Kuppel-, seltener Flammöfen oder Tiegel.

Das Einheitsgewicht grauen Gußeisens liegt zwischen 7,1 und 7,25 kg/dm<sup>3</sup>, die Ausdehnungsziffer durch die Wärme bei etwa 0,0011 für je 100° C, die Schwindung an geraden Stäben zwischen 0,9 und 1,35%. Als Mittelwert kann 1% gelten, während bei der Herstellung von Modellen in Rücksicht darauf, daß sich die einzelnen Teile eines Gußstückes meist gegenseitig an der freien Schwindung hindern, 0,75% benutzt zu werden pflegt.

## 2. Festigkeitsverhältnisse grauen Gußeisens.

### a). Zug- und Druckfestigkeit.

Die Schaulinien von Zug- und Druckversuchen an Gußeisen, Abb. 106 und 107, zeigen keine Verhältnisgleichheit zwischen Spannungen und Dehnungen, keine Elastizitäts- und Fließgrenze und ein sehr geringes Arbeitsvermögen. In den Abbildungen sind in den rechten oberen Vierteln Zugversuche, in den linken unteren Druckversuche an verschiedenen Sorten Gußeisen dargestellt, in Abb. 107 insbesondere an sieben Arten, die die Motorenfabrik Deutz laufend in ihrem Betrieb verwendet und von denen sie Proben für die Versuche dem Verfasser freundlichst zur Verfügung gestellt hatte. Die Versuche wurden unter Feinmessungen der elastischen und bleibenden Formänderungen an den Zugstäben bis zum Bruch, an den Druckproben bis 5000 kg/cm<sup>2</sup> Spannung durchgeführt. Dabei

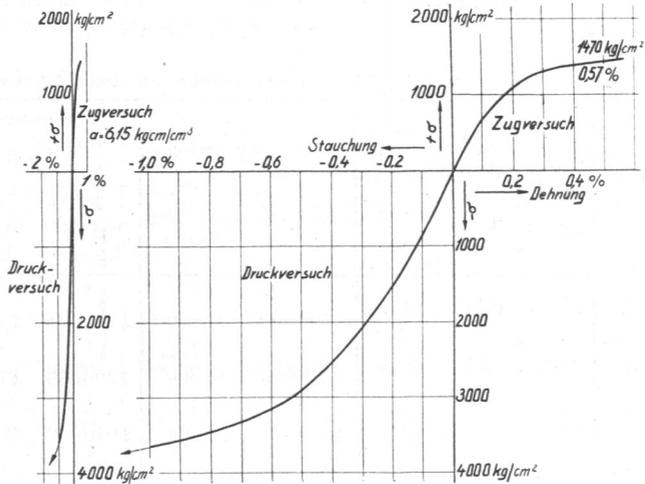


Abb. 106. Zug- und Druckversuch an Gußeisen, links vergleichshalber im gleichen Maßstabe wie Abb. 97.

hatten die Zugstäbe im zylindrischen Mittelteil rund 20 mm Durchmesser und 100 mm Meßlänge, die Druckproben 25 mm Durchmesser und 60 mm Höhe bei 50 mm Meßlänge. Alle Körper waren sorgfältig bearbeitet. Da sämtliche Druckproben bei 5000 kg/cm<sup>2</sup> Belastung standhielten, wurde zur Ergänzung die Druckfestigkeit an kleineren Stücken von 15 mm Durchmesser und 15 mm Höhe ermittelt. Die Hauptergebnisse sind in den Zusammenstellungen 30 und 31 wiedergegeben. Die Zugfestigkeit liegt zwischen 2500 und 1330 kg/cm<sup>2</sup>, die zugehörige Bruchdehnung zwischen 0,73 und 0,51%. Dementsprechend ist das spezifische Arbeitsvermögen im Vergleich mit anderen Werkstoffen des Maschinenbaues sehr niedrig: 13,4 bis 7,1 kgcm/cm<sup>3</sup>, wie auch anschaulich aus der linken Nebenabbildung zu Nr. 106 hervorgeht, welche im gleichen Maßstab, wie die Abb. 97, 127 anderer Konstruktionsstoffe aufgetragen ist.

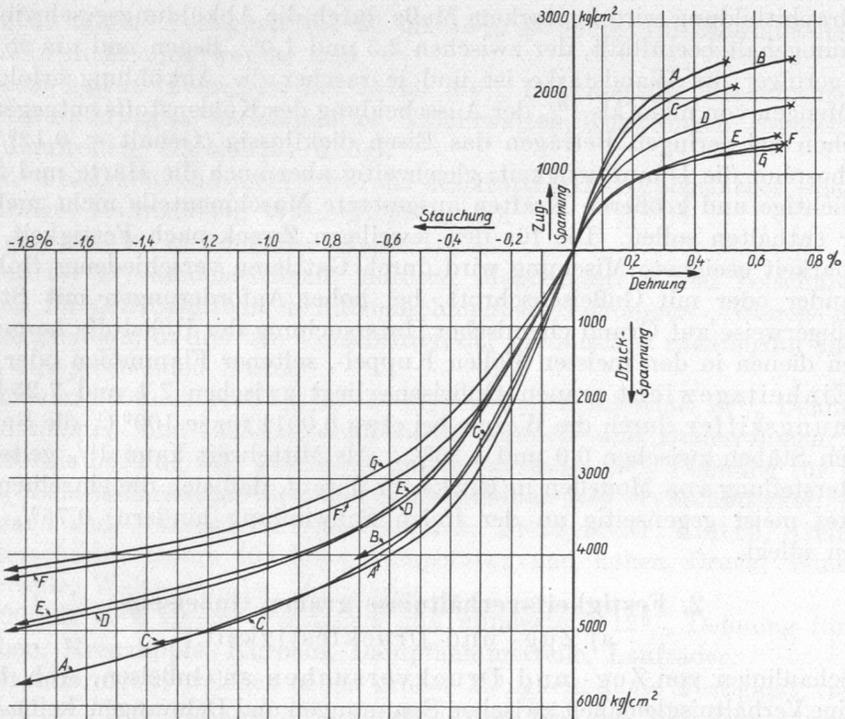


Abb. 107. Zug- und Druckversuche an 7 Gußeisensorten der Motorenfabrik Deutz. Vgl. Zusammenstellung 30 und 31 (Verfasser).

Zusammenstellung 30. Zugversuche an den Gußeisensorten A—G, Abb. 107 oben.

| Sorte | Zugfestigkeit $K_z$<br>kg/cm <sup>2</sup> | Bruchdehnung<br>% | Arbeitsvermögen<br>kg cm<br>cm <sup>3</sup> | Dehnungszahl $\alpha$ in cm <sup>2</sup> /kg |                   |                                      |                                       |                                       |                                       |                                       |
|-------|---|-------------------|---|--|-------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
|       |   |                   |   | bei erstmaliger Belastung                    |                   | bei wiederholter Belastung zwischen  |                                       |                                       |                                       |                                       |
|       |   |                   |   | bei 100<br>kg/cm <sup>2</sup>                | nahe dem<br>Bruch | 100<br>und 500<br>kg/cm <sup>2</sup> | 100<br>und 1000<br>kg/cm <sup>2</sup> | 100<br>und 1500<br>kg/cm <sup>2</sup> | 100<br>und 2000<br>kg/cm <sup>2</sup> | 100<br>und 2500<br>kg/cm <sup>2</sup> |
| A     | 2480                                      | 0,51              | 8,7   | 1  | 1                 | 1                                    | 1                                     | 1                                     | 1                                     | —                                     |
|       |   |                   |   | 1190000                                      | 138000            | 1235000                              | 1181000                               | 1076000                               | 974000                                | —                                     |
| B     | 2500                                      | 0,73              | 13,4  | 1  | 1                 | 1                                    | 1                                     | 1                                     | 1                                     | 1                                     |
|       |   |                   |   | 1250000                                      | 60000             | 1200000                              | 1102000                               | 1000000                               | 887000                                | 789000                                |
| C     | 2110                                      | 0,53              | 7,6   | 1  | 1                 | 1                                    | 1                                     | 1                                     | 1                                     | —                                     |
|       |   |                   |   | 1050000                                      | 110000            | 1010000                              | 900000                                | 820000                                | 735000                                | —                                     |
| D     | 1880                                      | 0,72              | 9,7   | 1  | 1                 | 1                                    | 1                                     | 1                                     | —                                     | —                                     |
|       |   |                   |   | 1240000                                      | 71000             | 1153000                              | 893000                                | 620000                                | —                                     | —                                     |
| E     | 1475                                      | 0,68              | 7,5   | 1  | 1                 | 1                                    | 1                                     | —                                     | —                                     | —                                     |
|       |   |                   |   | 565000                                       | 57000             | 855000                               | 710000                                | 100 und 1250<br>kg/cm <sup>2</sup>    | —                                     | —                                     |
| F     | 1390                                      | 0,70              | 7,1   | 1  | 1                 | 1                                    | 1                                     | 1                                     | —                                     | —                                     |
|       |   |                   |   | 772000                                       | 45000             | 728000                               | 507000                                | 463000                                | 100 und 1300<br>kg/cm <sup>2</sup>    | —                                     |
| G     | 1330                                      | 0,69              | 7,5   | 1  | 1                 | 1                                    | 1                                     | 1                                     | —                                     | —                                     |
|       |   |                   |   | 743000                                       | 37000             | 721000                               | 560000                                | 482000                                | —                                     | —                                     |

Bei der erstmaligen Belastung treten schon unter niedrigen Spannungen bleibende Formänderungen auf. Der Bruch erfolgt plötzlich, ohne Einschnürung, zeigt hell- bis dunkelgraue Farbe und körniges Gefüge, das meist um so feiner ist, je höher die Festigkeit liegt.

Für gewöhnliches Gußeisen darf  $K_z = 1100$  bis  $1500 \text{ kg/cm}^2$  verlangt werden, bei hochwertigen Sorten steigt die Zugfestigkeit auf  $2000$  bis  $2600 \text{ kg/cm}^2$ . In neuerer Zeit ist es gelungen, unter Niedrighalten des Kohlenstoffgehalts auf  $2,4$  bis  $2,8\%$  oder durch hohe Überhitzung des Eisens beim Gießen oder unter Vorwärmen der Formen, Zugfestigkeiten von  $3000$  und mehr  $\text{kg/cm}^2$  zu erreichen.

Unbearbeitete Stäbe ergeben infolge der spröden Gußhaut um  $15$  bis  $20\%$  geringere Zahlen.

Der mäßigen Zugfestigkeit steht eine erheblich größere Widerstandsfähigkeit bei Inanspruchnahme auf Druck gegenüber, die bei den Sorten der Zusammenstellungen 30 und 31 das  $3,8$ - bis  $5,3$ fache der ersteren betrug. Dabei ist sie in starkem Maße von der Form der Probekörper, bei zylindrischer insbesondere von dem Verhältnis der Höhe zum Durchmesser abhängig, weil bei größerer Höhe Nebenbeanspruchungen auf Knickung und Biegung nicht zu vermeiden sind. An Proben mit einer Höhe gleich dem Durchmesser findet man  $K$  zwischen  $6000$  bis  $10000$  selbst bis zu  $12000 \text{ kg/cm}^2$ .

Der Bruch erfolgt je nach der Höhe der Proben in verschiedener Weise; an niedrigen durch die Wirkung der Druckkegel oder -pyramiden, die sich auf den Endflächen bilden, an hohen durch Abgleiten längs einer schiefen Fläche.

Zusammenstellung 31. Druckversuche an den Gußeisensorten A—G, Abb. 107 unten.

| Sorte | Druckfestigkeit $K$<br>$\text{kg/cm}^2$ | Stauchung bei $5000 \text{ kg/cm}^2$<br>% | Dehnungszahl $\alpha$ in $\text{cm}^2/\text{kg}$ |                            |  |  |  |  |  |
|-------|---|---|--|----------------------------|--|--|--|--|--|
|       |   |   | bei erstmal. Belastung                           |                            | bei wiederholter Belastung zwischen    |  |  |  |  |
|       |   |   | bei $100 \text{ kg/cm}^2$                        | bei $5000 \text{ kg/cm}^2$ | $100 \text{ u. } 1000 \text{ kg/cm}^2$ | $100 \text{ u. } 2000 \text{ kg/cm}^2$ | $100 \text{ u. } 3000 \text{ kg/cm}^2$ | $100 \text{ u. } 4000 \text{ kg/cm}^2$ | $100 \text{ u. } 5000 \text{ kg/cm}^2$ |
| A     | 9540                                    | 1,23                                      | 1  | 1                          | 1                                      | 1                                      | 1                                      | 1                                      | 1                                      |
|       |   |   | 1093000  | 107000                     | 1130000                                | 1127000                                | 1140000                                | 1115000                                | 1142000                                |
| B     | 9420                                    | —   | 1  | —                          | 1                                      | 1                                      | 1                                      | 1                                      | —                                      |
|       |   |   | 1076000  | —                          | 953000                                 | 1000000                                | 1027000                                | 1029000                                | —                                      |
| C     | 8930                                    | 1,29                                      | 1  | 1                          | 1                                      | 1                                      | 1                                      | 1                                      | 1                                      |
|       |   |   | 899000   | 143000                     | 901000                                 | 935000                                 | 965000                                 | 1002000                                | 1072000                                |
| D     | 8370                                    | 1,86                                      | 1  | 1                          | 1                                      | 1                                      | 1                                      | 1                                      | 1                                      |
|       |   |   | 848000   | 64000                      | 794000                                 | 820000                                 | 827000                                 | 920000                                 | 913000                                 |
| E     | 7810                                    | 1,9                                       | 1  | 1                          | 1                                      | 1                                      | 1                                      | —                                      | —                                      |
|       |   |   | 734000   | 93500                      | 803000                                 | 835000                                 | 865000                                 | —                                      | —                                      |
| F     | 6390                                    | —   | 1  | 1                          | 1                                      | 1                                      | 1                                      | 1                                      | —                                      |
|       |   |   | 864000   | 75300                      | 841000                                 | 845000                                 | 843000                                 | 838000                                 | —                                      |
| G     | 6680                                    | —   | 1  | 1                          | 1                                      | 1                                      | 1                                      | 1                                      | —                                      |
|       |   |   | 761000   | 84000                      | 722000                                 | 726000                                 | 793000                                 | 828000                                 | —                                      |

Die Elastizitätszahl ist entsprechend dem gekrümmten Verlauf der Spannungsdehnungslinie bei der erstmaligen Belastung sehr stark veränderlich. Beispielweise ergab das Gußeisen D der Abb. 107 beim Zugversuch  $\alpha = \frac{1}{1240000}$  bei ganz niedrigen

Spannungen,  $\alpha = \frac{1}{71000}$  kurz vor dem Bruche, beim Druckversuch  $\alpha = \frac{1}{848000}$  bei  $100$

und  $\frac{1}{64000} \text{ cm}^2/\text{kg}$  bei  $5000 \text{ kg/cm}^2$  Spannung. Diese Zahlen haben aber praktisch geringe

Bedeutung, weil sie nur für die erste, nicht aber für weitere Belastungen gelten, da das Gußeisen, nachdem es bleibende Formänderungen durch die erste Belastung angenommen hat, in einen wesentlich vollkommener elastischen Zustand übergeht. Dabei folgt die Spannung bei der Belastung nicht der gleichen Linie wie bei der Entlastung, eine Erscheinung, die man als elastische Hysterisis bezeichnet, und die sich durch verhältnismäßig große Schleifen, in Abb. 108 am Gußeisen D der oben erwähnten Versuchsreihe dargestellt, ausprägt. Der Inhalt der Schleifen ist eine Form-

**Hysteresis am Gußeisen D beim Zugversuch.**

| Schleife<br>Abb. 108 | Belastungsstufe<br>kg/cm <sup>2</sup> | Form-<br>änderungsarbeit<br>kgcm/cm <sup>3</sup> |
|----------------------|---------------------------------------|--|
| a                    | 100 — 500                             | 0,006  |
| b                    | 100 — 1000                            | 0,052  |
| c                    | 100 — 1500                            | 0,22   |

änderungsarbeit, die bei jedem vollen Spannungskreislauf von neuem aufgebracht werden muß.

Der Zugstab wurde in Stufen zwischen 100 und 500, 1000 und 1500 kg/cm<sup>2</sup> belastet. Die dabei erhaltenen Schleifen a, b und c wachsen mit steigendem Spannungsunterschied und ergeben die nebenstehenden Formänderungsarbeiten.

Beim Druckversuch an dem gleichen Gußeisen werden die Erscheinungen noch viel deutlicher, wie im linken unteren Viertel der Abb. 108 an fünf Spannungsstufen zwischen 100 und 500, 1000, 2000, 3000 und 4000 kg/cm<sup>2</sup> dargestellt ist.

**Hysteresis am Gußeisen D beim Druckversuch.**

| Schleife<br>Abb. 108 | Belastungs-<br>stufe<br>kg/cm <sup>2</sup> | Formänderungsarbeit<br>bei der              |  |
|----------------------|--|---|--|
|                      |  | ersten<br>Belastung<br>kgcm/cm <sup>3</sup> | zweiten<br>Belastung<br>kgcm/cm <sup>3</sup> |
| d                    | 100 — 500                                  | 0,005                                       | —  |
| e                    | 100 — 1000                                 | 0,036                                       | —  |
| f                    | 100 — 2000                                 | 0,214                                       | —  |
| g                    | 100 — 3000                                 | 0,609                                       | —  |
| h                    | 100 — 4000                                 | 1,51  | —  |
| i                    | 100 — 4000                                 | —   | 1,40   |

Wiederholte Belastung in ein und derselben Stufe, Schleifen h und i, zeigt, daß sich die Schleifen unter zunehmenden bleibenden Formänderungen verschieben und daß ihr Flächeninhalt und damit die Formänderungsarbeit, wie nebenstehend, kleiner wird.

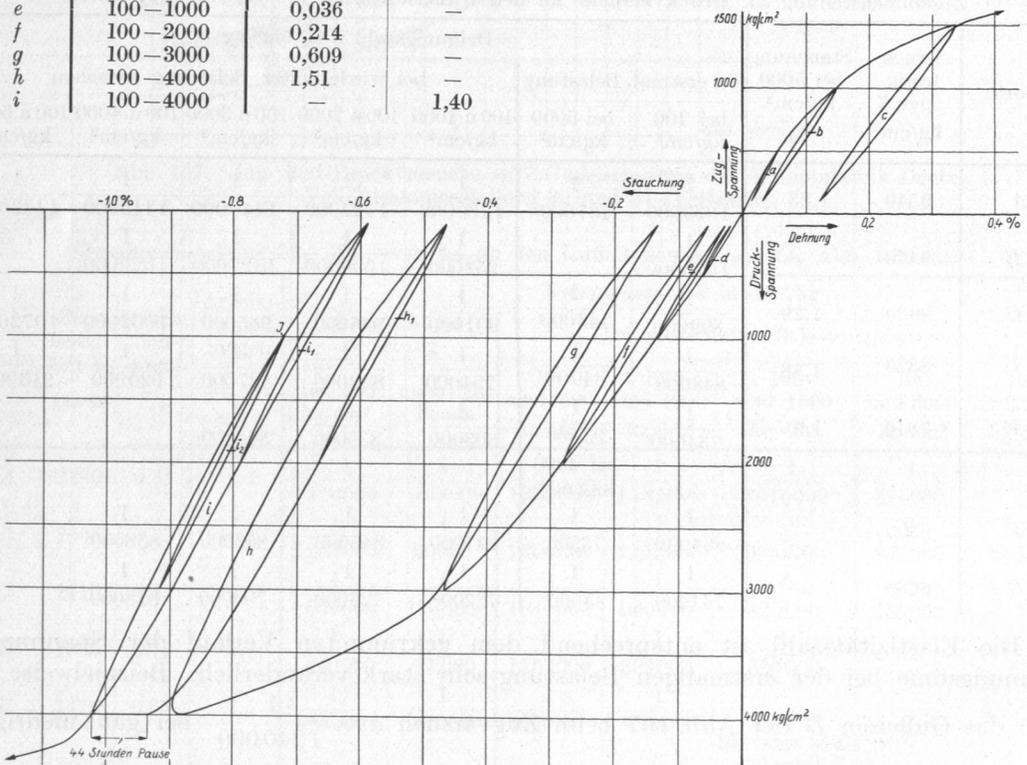


Abb. 108. Hysteresis am Gußeisen D der Zusammenstellungen 30 und 31 (Verfasser).

Bei einem Druckversuch an einem anderen, schon wiederholt belasteten Gußeisen, fanden sich die Zahlen:

| Belastungsstufe<br>kg/cm <sup>2</sup> | Formänderungsarbeit<br>nach häufiger Belastung<br>kgcm/cm <sup>3</sup> |
|---------------------------------------|--|
| 100 — 600                             | 0,010  |
| 100 — 900                             | 0,0262   |
| 100 — 1200                            | 0,0437   |

Betrachtet man die einzelne, bei einer Be- und Entlastung entstehende Schleife, so setzt sie sich zusammen aus einer schwach gekrümmten Linie bei der Stauchung bzw. während des Wiederzusammenziehens und einer wesentlich stärker gekrümmten bei der Reckung bzw.

während des Wiederausdehnens der Proben. Bei größeren Spannungsstufen und an

weichen Gußeisensorten tritt diese besondere Form allerdings zurück; beide Linien krümmen sich ungefähr in dem gleichen Maße und lassen die Schleifen annähernd symmetrisch zu ihrer Mittellinie werden.

Bemerkenswert ist nun, daß die für die praktische Berechnung von Formänderungen an gußeisernen Teilen maßgebenden Dehnungszahlen, wie sie durch die mittlere Neigung der Schleifen gegeben sind, in wesentlich engeren Grenzen schwanken, als die bei der erstmaligen Belastung des Gußeisens gefundenen. Sie sind für die sieben verschiedenen Gußeisensorten in den letzten Spalten der Zusammenstellungen 30 und 31 aufgeführt und entsprechen dem oben erwähnten wesentlich vollkommener elastischen Zustande bei wiederholter Belastung. Bei den Sorten *A* und *B* von hoher Festigkeit ändern sie sich, namentlich bei Inanspruchnahme auf Druck nur noch in geringem Maße und dürfen durch einen Durchschnittswert für alle Spannungen ersetzt werden. (Bei Beanspruchung auf Druck  $\frac{1}{1150000}$  cm<sup>2</sup>/kg am Gußeisen *A*,  $\frac{1}{1000000}$  am Gußeisen *B*.)

War das Gußeisen hoch vorbeanspruchert, wie im Falle der Abb. 108 nach Durchlaufen der Schleifen *h* und *i*, und wird es nun innerhalb engerer Grenzen z. B. nach den Schleifen *h*<sub>1</sub> und *i*<sub>1</sub> zwischen 100 und 2000 kg/cm<sup>2</sup> belastet, so folgen die Belastungslinien genau denjenigen der Schleifen *h* und *i*. Der Schleifeninhalt ist jedoch kleiner als der der Schleife *f* bei der erstmaligen Belastung zwischen 100 und 2000 kg/cm<sup>2</sup>.

Gußeisen D.

| Schleife<br>Abb. 108  | Belastungs-<br>stufe<br>kg/cm <sup>2</sup> | Form-<br>änderungsarbeit<br>kgem/cm <sup>3</sup> |
|-----------------------|--|--|
| <i>h</i> <sub>1</sub> | 100–2000                                   | 0,161  |
| <i>i</i> <sub>1</sub> | 100–2000                                   | 0,176  |
| <i>i</i> <sub>2</sub> | 1000–3000                                  | 0,152  |
| <i>f</i>              | 100–2000                                   | 0,214  |

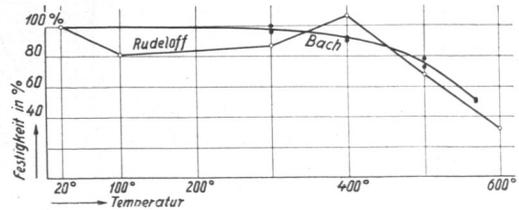


Abb. 109. Einfluß der Temperatur auf die Zugfestigkeit von Gußeisen (Bach, Rudeloff).

Schließlich zeigt die Schleife *i*<sub>2</sub> noch, daß das Gußeisen, wenn es beim Entlasten auf 1000 kg/cm<sup>2</sup> im Punkte *J* wieder bis zu 3000 kg/cm<sup>2</sup> belastet wird, die bleibende Formänderung, die dem Punkte *J* entspricht, beibehält und daß sich nun eine kleinere Hysteresisschleife mit etwa der gleichen Neigung wie *i*<sub>1</sub> unter Ablösung von der Entlastungslinie ausbildet.

Bei Untersuchungen über den Einfluß höherer Wärmegrade fand Bach [II, 17] an hochwertigem Gußeisen erst bei mehr als 300° eine wesentliche Abnahme der Zugfestigkeit, während Rudeloff [II, 15] allerdings unter Ausführung nur je eines Versuchs, eine sehr ungleichartige Wirkung höherer Temperaturen festgestellt hat. Die Zahlenwerte sind in der folgenden Zusammenstellung enthalten; Abb. 109 gibt eine Vorstellung über das Verhältnis der Festigkeit bei *t*<sup>0</sup> zu der bei 20°, welche letztere = 100% gesetzt ist.

Zusammenstellung 32. Zugfestigkeit von zwei Gußeisensorten in Abhängigkeit von der Temperatur nach Bach und Rudeloff.

| Temperatur <i>t</i> <sup>0</sup> C  | ~ 20     | 100  | 300  | 400  | 500  | 570  | 600° |                        |
|---|----------|------|------|------|------|------|------|------------------------|
| Zugfestigkeit <i>K</i> <sub>z</sub> , im Mittel aus 2 Versuchen,<br>Kleinster Wert von <i>K</i> <sub>z</sub> . . . . . }<br>Verhältnis der Festigkeit bei <i>t</i> <sup>0</sup> zu der bei<br>20° in Hundertteilen . . . . . }<br>Zugfestigkeit <i>K</i> <sub>z</sub> . . . . . }<br>Verhältnis der Festigkeit bei <i>t</i> <sup>0</sup> zu der<br>bei 20° in Hundertteilen . . . . . } | Bach     | 2362 | —    | 2335 | 2177 | 1793 | 1230 | — kg/cm <sup>2</sup>   |
|   |          | 2331 | —    | 2301 | 2172 | 1729 | 1223 | — kg/cm <sup>2</sup>   |
|   |          | 100  | —    | 99   | 92   | 76   | 52   | — %                    |
|   |          | 1300 | 1050 | 1140 | 1390 | 880  | —    | 430 kg/cm <sup>2</sup> |
|   | Rudeloff | 100  | 81   | 88   | 107  | 68   | —    | 33 %                   |

b) Biegefestigkeit.

Gußeisen ergibt, wie schon in Abschnitt 1 kurz erwähnt, bei Biegeversuchen stets größere Werte für die nach der üblichen Formel  $K_b = \frac{M_b}{W}$  berechnete Biegefestigkeit,

als seine Zugfestigkeit  $K_z$  erwarten läßt. Die Erscheinung erklärt sich, wie Bach zuerst gezeigt hat, aus der Veränderlichkeit der Dehnungszahl mit der Spannung, und zwar aus der dadurch bedingten wirklichen Spannungsverteilung im Augenblick des Bruches nach der gekrümmten Linie  $ABC$ , Abb. 110, sowie der Verschiebung der Nulllinie aus der Schwerachse  $S$  nach  $B$ , und aus der höheren Widerstandsfähigkeit des Gußeisens gegenüber Druck als gegen Zug. Abb. 110 bezieht sich auf den schon auf Seite 35 erwähnten Gußeisenstab von  $80 \cdot 80$  mm Querschnitt und  $l = 1$  m Stützlänge, der bei einer in der Mitte wirkenden Belastung von  $P = 7380$  kg brach. Zugversuche aus den Stabenden wiesen im Durchschnitt eine Zugfestigkeit von  $K_z = 1315$  kg/cm<sup>2</sup> nach. Voraussetzung für die Spannungsverteilung  $ABC$  ist:

1. daß die Querschnitte bei der Biegung des Stabes dauernd eben bleiben, eine Annahme, die durch anderweitige Untersuchungen gut begründet erscheint,
2. daß sich die auf Zug und Druck beanspruchten Fasern beim Biegeversuch in gleicher Weise wie beim Zug- und Druckversuch dehnen,

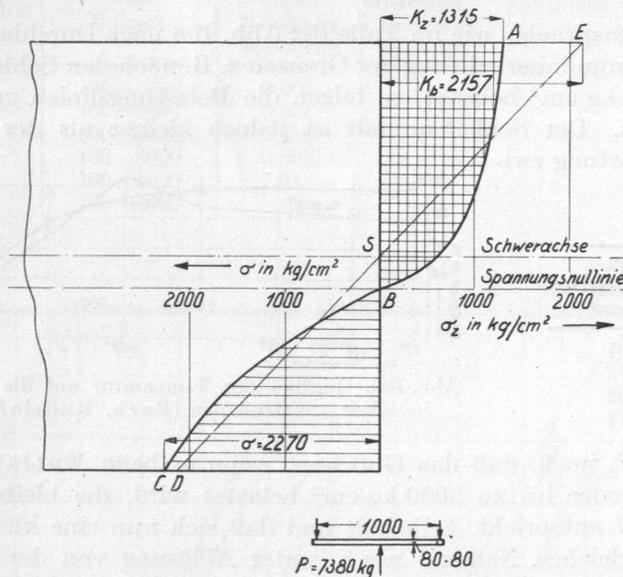


Abb. 110. Spannungsverteilung in einem auf Biegung beanspruchten Gußeisenstabe rechteckigen Querschnitts im Augenblick des Bruches (nach Bach).

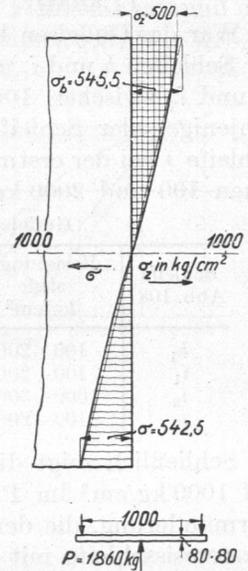


Abb. 111. Spannungsverteilung bei 1860 kg Belastung.

3. daß die größten Zugspannungen beim Zug- und Biegeversuch gleich groß (im betrachteten Falle 1315 kg/cm<sup>2</sup>) sind und daß daher die Zugfestigkeit für die Einleitung des Bruches maßgebend ist.

Dagegen setzt die Formel  $K_b = \frac{M_b}{W}$  die geradlinige Zunahme der Spannungen nach der gestrichelten Linie  $DSE$  voraus und läßt die Zugspannung bedeutend überschätzen. So wird am vorliegenden Stabe

$$K_b = \frac{M_b}{W} = \frac{7380 \cdot 100}{4 \cdot 8^3} \cdot 6 = 2157 \text{ kg/cm}^2,$$

d. i. 1,64mal so groß wie die Zugfestigkeit. Die Verschiebung der Nulllinie beträgt 6,2 mm. Über die Herleitung der Spannungsverteilung vgl. [II, 18].

Die im Augenblick des Bruches vorhandenen großen Abweichungen gegenüber der Theorie werden aber um so geringer, je niedriger die Spannungen sind. Die Spannungsverteilungslinie nähert sich dann mehr und mehr einer Geraden, während die Nulllinie an den Schwerpunkt heranrückt, so daß die Formel in den im Maschinenbau üblichen Grenzen, namentlich unter Beachtung der Ungleichmäßigkeit des Gußeisens selbst, vollständig genügend genaue Werte für die auftretenden Spannungen liefert. Abb. 111 zeigt

das an dem gleichen Gußeisenstabe bei 1860 kg Belastung, also bei rund vierfacher Sicherheit gegen Bruch. Während die rechnermäßige Biegespannung

$$\sigma_b = \frac{M_b}{W} = \frac{1860 \cdot 100 \cdot 6}{4 \cdot 8^3} = \pm 545,5 \text{ kg/cm}^2$$

ist, wird die wirkliche, auf Grund des Zug- und des Druckversuchs an dem verwandten Gußeisen ermittelte + 500 kg/cm<sup>2</sup> auf der Zug- und - 542,5 kg/cm<sup>2</sup> auf der Druckseite des Stabes. Der Nullpunkt fällt praktisch mit dem Schwerpunkt zusammen.

Abb. 110 zeigt ferner, daß die mittleren Fasern des Querschnittes günstiger ausgenutzt werden, als nach der geradlinigen Spannungsverteilung zu erwarten ist. Hierin liegt die Begründung für die Tatsache, daß die Biegefestigkeit gußeiserner Stäbe von der Querschnittform abhängig ist [II, 18]. Und zwar überschreitet die Biegefestigkeit  $K_b$  nach den im folgenden zusammengestellten, von Bach gefundenen Zahlenwerten die Zugfestigkeit  $K_z$  um so mehr, je stärker der Stoff nach der Nullachse hin zusammengedrängt ist.

Zusammenstellung 33. Biegefestigkeit von Gußeisen in Abhängigkeit von der Querschnittform (Bach).

| Querschnittform | Maße mm | Zugfestigkeit $K_z$ kg/cm <sup>2</sup> | Biegefestigkeit $K_b$ kg/cm <sup>2</sup> | $\frac{K_b}{K_z}$ | $\mu_0 \sqrt{\frac{e}{z_0}}$ | Bemerkungen                                    |
|-----------------|---------|--|--|-------------------|------------------------------|--|
|                 |         | 1369                                   | 1979                                     | 1,45              | 1,43                         | Bearbeitet                                     |
|                 |         | 1595                                   | 2254                                     | 1,41              | —                            | „  |
|                 |         | 1595                                   | 2026                                     | 1,27              | —                            | Biegestab unbearbeitet                         |
|                 |         | 1369                                   | 2081                                     | 1,52              | 1,49                         | „  |
|                 |         | 1369                                   | 2076                                     | 1,52              | 1,49                         | Schmäler Flansch zerrissen, breiter unverletzt |
|                 |         | 1369                                   | 2395                                     | 1,75              | 1,70                         | Bearbeitet                                     |
|                 | 30 □    | 1369                                   | 2372                                     | 1,73              | 1,70                         | Bearbeitet                                     |
|                 | 30 □    | 1418                                   | 2539                                     | 1,78              |                              | „  |
|                 | 30 □    | 1595                                   | 2765                                     | 1,73              | 1,41                         | „  |
|                 | 30 □    | 2394                                   | 4315                                     | 1,80              |                              | Biegestäbe unbearbeitet                        |
|                 | 30 □    | 2331                                   | 4435                                     | 1,90              |                              | „  |
|                 | 40 □    | 1595                                   | 2295                                     | 1,44              |                              | „  |
| 32 □            | 1595    | 2390                                   | 1,50                                     | „                 |                              |  |
|                 | 30 ∅    | 1369                                   | 2905                                     | 2,12              | 2,05                         | Bearbeitet                                     |
|                 | 36 ∅    | 1848                                   | 4139                                     | 2,24              |                              | „  |
|                 |         | 1369                                   | 2929                                     | 2,14              | 2,06                         | „  |
|                 |         | 1369                                   | 3218                                     | 2,35              | 2,31                         | „  |
|                 |         | 1310                                   | 2114                                     | 1,61              | 1,40                         | Biegestab unbearbeitet                         |

Als Beziehung zwischen  $K_z$  und  $K_b$  gibt Bach

$$K_b = \mu_0 \sqrt{\frac{e}{z_0}} \cdot K_z \quad (82)$$

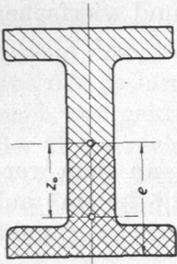


Abb. 112.

an, wobei  $\mu_0 = 1,2$  für Querschnitte gilt, welche parallel zur Nullachse durch eine wagrechte Gerade begrenzt sind, während  $\mu_0 = 1,33$  ist, wenn nur eine einzige Faser am stärksten gespannt, beide Male aber das Gußeisen bearbeitet ist.  $\mu_0$  beträgt 1 bzw. 1,1, wenn die Gußhaut noch vorhanden ist.  $e$  bedeutet den Abstand der äußersten, auf Zug beanspruchten Faser,  $z_0$  nach Abb. 112 den Abstand des Schwerpunktes des auf derselben Seite der Schwerlinie gelegenen Teils der Querschnittfläche.

Die Zugfestigkeit ist durchweg an bearbeiteten Proben ermittelt. Die Biegeversuche an den Stäben quadratischen und I-förmigen Querschnitts lassen dadurch, daß sie teils bearbeitet, teils unbearbeitet waren, einen Schluß auf den Einfluß der Gußhaut zu. Durch die größere Sprödigkeit der äußeren Schicht, vielleicht auch durch vermehrte Gußspannungen wird die Biegefestigkeit im Mittel auf 83% von derjenigen bearbeiteter Stäbe herabgesetzt.

Erheblichen Einfluß auf die Biegefestigkeit hat die Stützweite im Verhältnis zur Höhe des Querschnitts. Kurze Stäbe ergeben größere Bruchspannungen, so daß die Fehler bei der Berechnung nach der einfachen Formel  $K_b = \frac{M_b}{W}$  zunehmen. Wawrziniok fand bei Versuchen an Stäben von 30 · 30 mm Querschnitt aus Gußeisen von  $K_z = 1415 \text{ kg/cm}^2$  Zugfestigkeit im Mittel aus je fünf Versuchen folgende Zahlen [II, 41]:

| Stützweite<br>mm | Biegefestigkeit $K_b$<br>kg/cm <sup>2</sup> | Zunahme<br>% |
|------------------|---|--------------|
| 1000             | 2300  | —            |
| 500              | 2400  | 4,3          |
| 300              | 2590  | 12,6         |
| 200              | 2630  | 14,4         |

### c) Drehfestigkeit.

Auch gegenüber Drehmomenten zeigt sich die Widerstandsfähigkeit des Gußeisens in starkem Maße von der Querschnittsform abhängig. Die folgende Zusammenstellung bezieht sich auf eine Versuchsreihe Bachs an Gußeisen von  $K_z = 1579 \text{ kg/cm}^2$  Zugfestigkeit [II, 19]. Nach derselben ist das theoretisch zu erwartende Verhältnis der Drehfestigkeit zur Zugfestigkeit von 0,8 nur für den Kreisringquerschnitt zutreffend. Die Querschnittsformen 1 bis 6 zeigen wesentlich größere Widerstandsfähigkeit. Bei den L und I-Querschnitten Nr. 9 bis 13 ist zu bemerken, daß der Bruch an ihnen durch Einreißen der Flansche eingeleitet wurde, daß sie aber trotz dieser Schwächung durch den Anriß weitersteigende Drehmomente aushielten und annähernd rechteckigen Querschnitten mit der mittleren Wandstärke als Breite und der Summe der Steghöhe  $h$  und der Flanschbreiten  $b_0$  als Höhe gleichwertig sind, wie es die Formeln der Zusammenstellung zeigen. Dabei dürfen allerdings die Flanschbreiten im Verhältnis zur Steghöhe nicht zu groß sein. Der Kreuzquerschnitt Nr. 14 kann entsprechend als Rechteck mit den Seitenlängen  $s$  und  $2h - s$  aufgefaßt werden. Die Gußhaut hat geringen Einfluß. Die Abbildungen sind zwar nicht in gleichem Maßstabe, wohl aber den Querschnitten geometrisch ähnlich gezeichnet.  $U$  bedeutet unbearbeitet,  $B$  bearbeitet.

Wie bei der Inanspruchnahme auf Zug, Druck und Biegung zeigt Gußeisen auch bei derjenigen auf Verdrehung keine Verhältnismäßigkeit zwischen Spannungen und Formänderungen; die Gleitziffer nimmt von  $\beta = \frac{1}{400000}$  bei niedrigen Spannungen auf

$\frac{1}{290000} \text{ cm}^2/\text{kg}$  bei hohen zu.

Zusammenstellung 34. Drehfestigkeit von Gußeisen in Abhängigkeit von der Querschnittform (Bach).

| Lfd. Nr. | Querschnittform<br>cm | Bearbeitungs-<br>zustand | Ver-<br>suchs-<br>zahl | Querschnittabmessungen<br>cm                 | Bruchspannung $K_a$<br>kg/cm <sup>2</sup>                               | $\frac{K_a}{K_z}$ |
|----------|-----------------------|--------------------------|------------------------|--|---|-------------------|
| 1        |                       | U                        | 4                      | 3,15 · 3,20                                  | $K_a = 4,5 \frac{M_a}{b^2 h} = 2228$                                    | 1,42              |
| 2        |                       | U                        | 4                      | 3,13 · 7,82                                  | „ „ = 2529  | 1,60              |
| 3        |                       | U                        | 4                      | 3,08 · 15,07                                 | „ „ = 2366  | 1,50              |
| 4        |                       | U                        | 3                      | 1,66 · 15,13                                 | „ „ = 2508  | 1,59              |
| 5        |                       | U                        | 3                      | 10,23 Ø                                      | $K_a = \frac{16}{\pi} \cdot \frac{M_a}{d^3} = 1618$                     | 1,02              |
| 6        |                       | B                        | 1                      | 9,6 Ø  | „ „ 1655  | 1,05              |
| 7        |                       | U                        | 3                      | $d_a = 10,2 \text{ Ø}, d_i = 6,97 \text{ Ø}$ | $K_a = \frac{16}{\pi} \cdot \frac{M_a}{d_a^4 - d_i^4} \cdot d_a = 1297$ | 0,82              |
| 8        |                       | U                        | 4                      | $a = 6,21, a_0 = 3,16$                       | $K_a = 4,5 \frac{M_a}{a^4 - a_0^4} \cdot a = 1788$                      | 1,13              |
| 9        |                       | U                        | 3                      | $h = 15,1, b_0 = 8,6, s = 1,7$               | $K_a = 4,5 \frac{M_a}{s^2 (h + 2b_0)} = 1800$                           | 1,14              |
| 10       |                       | U                        | 3                      | $h = 15,2, b_0 = 3,5, s = 1,7$               | „ „ = 1890  | 1,20              |
| 11       |                       | U                        | 3                      | $h = 15,2, b_0 = 8,6, s = 1,6$               | „ „ = 2770  | 1,75              |
| 12       |                       | U                        | 3                      | $h = 15,1, b_0 = 3,4, s = 1,7$               | „ „ = 2480  | 1,57              |
| 13       |                       | U                        | 1                      | $h = 15,1, b_0 = 0,9, s = 1,8$               | „ „ = 2650  | 1,68              |
| 14       |                       | U                        | 2                      | $h = 15,1, s = 2,1$                          | $K_a = 4,5 \frac{M_a}{s^2 (2h - s)} = 2587$                             | 1,64              |

3. Anforderungen an Gußeisen.

Zur Beurteilung der mechanischen Eigenschaften dient an Stelle des Zugversuchs meist der Biegeversuch, weil er rascher und leichter durchzuführen ist, und weil er der