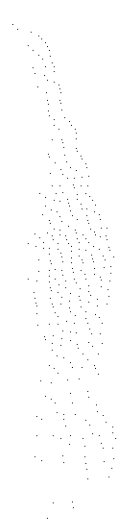




**ZGV**

***Der Elastizitätsmodul  
von graphitischen Gußeisen***



# Der Elastizitätsmodul von graphitischen Gußeisen

Bei graphitischen Gußeisenwerkstoffen ist der elastische Anteil der Spannungs-Dehnungs-Kurve häufig merklich nichtlinear. Die Ursache ist eine örtliche plastische Verformung, die bereits weit unterhalb der Streckgrenze des Werkstoffs an den Grenzen Grundmasse-Graphit auftritt. Wegen dieses komplexen Verhaltens sind die gemessenen Werte des Elastizitätsmoduls bei Gußeisenwerkstoffen nicht nur abhängig von der Ausbildung des Graphits und der Grundmasse, sondern auch von der Art und Weise, wie er bestimmt wird. In dieser Arbeit wird ein Betriebsmodul als eine Möglichkeit vorgeschlagen, um das wahre Verhalten eines Bauteils zu charakterisieren.

Der Elastizitätsmodul (E-Modul) ist eine der grundlegenden Eigenschaften eines Werkstoffs. Seine exakte Messung ist erforderlich, wenn sowohl die Steifigkeit als auch die Streckgrenze bestimmt werden sollen. Bei graphitischen Gußeisenwerkstoffen ist jedoch die Spannungs-Dehnungs-Kurve bereits im Anfangsbereich nichtlinear, so daß die Bestimmung des E-Moduls pro-

blematisch wird. Dieses nichtlineare Verhalten beruht auf örtlichen plastischen Verformungen, die im Gefüge von Gußeisen selbst bei relativ niedrigen Belastungen beim Zugversuch oder im Einsatz von Bauteilen auftreten. In dieser Arbeit soll der E-Modul von graphitischen Gußeisen näher betrachtet werden, um die Einflußgrößen zu erkennen, die bei der Messung des E-Moduls eine

Rolle spielen, und diese Eigentümlichkeiten von Gußeisen mit dem Verhalten der Bauteile im Betriebseinsatz zu korrelieren. Weiterhin soll die Kenntnis der Verformungen im Mikrobereich bei niedrigen Belastungen verbessert und das Verhalten aus dem komplexen Gefüge von Gußeisenwerkstoffen erklärt werden.

## Definition des Elastizitätsmoduls (E-Modul)

### Typische Verfahren zum Bestimmen des E-Moduls

Der Anfangsbereich der Spannungs-Dehnungs-Kurve, die unter einachsiger Zugbelastung erhalten wird, entspricht bei den meisten Metallen der elastischen Verformung und stellt eine Gerade dar, Bild 2, links. Die Belastung kann in jedem Punkt dieser Geraden aufgehoben werden, ohne daß die Probe eine bleibende Verformung zeigt. In diesem elastischen Bereich ist die Spannung der Dehnung proportional (Hookesche Gerade). Der E-Modul ist das Verhältnis der Spannung zur Dehnung im elastischen Teil des Spannungs-Dehnungs-Diagramms [1]. Er dient zum Beschreiben des elastischen Verhaltens des Werkstoffs, unabhängig von der Konfiguration oder der Art der Verformung.

Der E-Modul ist eine Kenngröße für die Steifigkeit des Werkstoffs. Er hängt vor allem von der Atombindung, der Kristall-

struktur und -orientierung, der chemischen Zusammensetzung und dem Gefüge von kompakten Metallen und Legierungen ab. Je größer der E-Modul ist, desto geringer ist die elastische

Dehnung bei einer bestimmten Belastung, beziehungsweise bei einer vorgegebenen Spannung ist die Formänderung bei einem Werkstoff mit niedrigerem E-Modul größer.

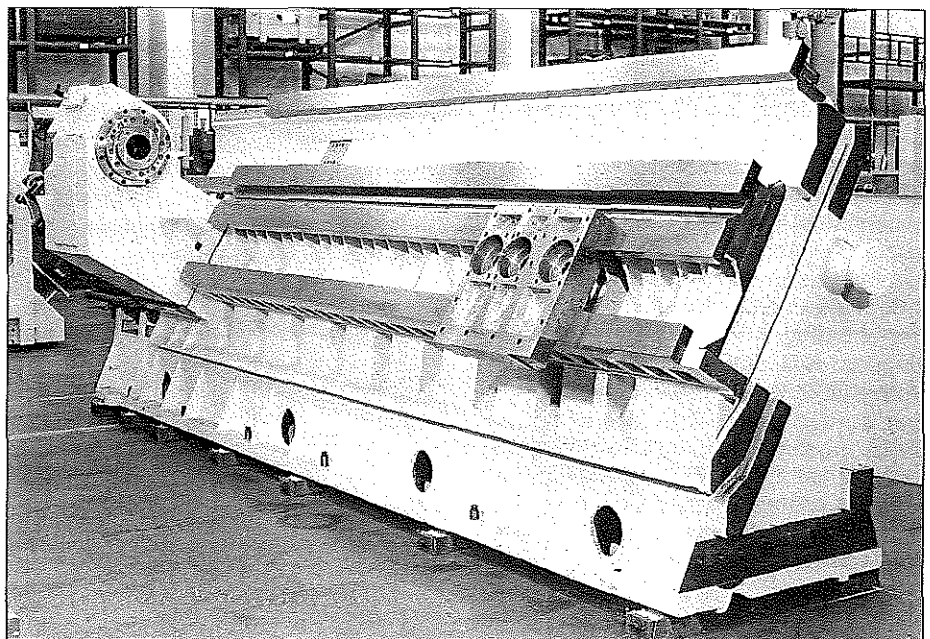


Bild 1: Drehmaschinenbett aus EN-GJL-250/300 (GG-25/30); der große E-Modul des Werkstoffs sorgt für hohe Steifigkeit der Maschine als Voraussetzung für optimales Bearbeitungsergebnis. (Bild: Heid, Magdeburg)

Nachdruck des Vortrages Nr. TB-12 auf dem 61. Gießerei-Weltkongreß 1995 in Beijing, mit freundlicher Genehmigung der Veranstalter. Titel der Originalarbeit: „Young's Modulus in Graphitic Cast Irons“ Deutsche Bearbeitung von Dr.-Ing. K. Röhrig, Erkrath

## Bestimmen des dynamischen E-Moduls

Zur zerstörungsfreien Prüfung und Beurteilung von Werkstoffen werden Schallwellen benutzt. Akustische Verfahren werden auch verwendet, um den E-Modul von Gußeisen näherungsweise zu bestimmen. Hierzu werden gewöhnlich zwei dynamische Verfahren eingesetzt, nämlich das Impuls-Echo-Verfahren [2 bis 5] und die Messung der Resonanzfrequenz [6 bis 8].

Das Impuls-Echo-Verfahren beruht auf einer Zeit-Weg-Messung, während die Messung der Resonanzfrequenz  $\omega_0$  das Verhältnis von Schallgeschwindigkeit  $v$  zu Wellenlänge  $\lambda$  ausnutzt:

$$\omega_0 = v/\lambda$$

Beim Impuls-Echo-Verfahren wird von einem Prüfkopf ein Bündel elastischer Wellen mit einer Frequenz im MHz-Bereich durch einen Prüfkörper geschickt. Der Prüfkopf mißt die Laufzeit der elastischen Wellen durch den Prüfkörper und konvertiert diese mit Hilfe der grundlegenden physikalischen Gesetzmäßigkeiten in einen dynamischen E-Modul.

Beim Resonanzfrequenzverfahren wird im Prüfkörper über einen Bereich von Frequenzen eine periodische Schwingung erzeugt. Wenn eine Frequenz die Eigenfrequenz des Systems erreicht, die gewöhnlich im kHz-Bereich liegt, steigt die Schwingungsamplitude an und das System kommt in Resonanz. Die Resonanzfrequenz kann dann dazu dienen, einen äquivalenten E-Modul zu bestimmen.

Die mit akustischen Verfahren bestimmten E-Moduln werden als dynamische E-Moduln bezeichnet. Die Unterschiede, die zwischen den nach dynamischen und den nach statischen Verfahren ermittelten Werten bei Gußeisenwerkstoffen bestehen, können auf deren heterogenen Gefügebau sowie auf die unterschiedlichen Spannungsbereiche, bei denen die Messungen ausgeführt wurden, zurückgeführt werden. Es ist darauf hinzuweisen, daß diese dynamischen Verfahren nicht den E-Modul liefern, der über die Bestimmung der Steigung der Spannungs-Dehnungs-Kurve im Zugversuch erhalten wird. Mit anderen Worten: Statischer und dynamischer E-Modul sind zwei verschiedene Werkstoffeigenschaften, die nicht auf Unterschiede der Meßverfahren zurückgeführt werden können.

## Probleme beim Bestimmen des Elastizitätsmoduls

### Ausrüstungen und Meßverfahren

Bei den meisten Zerreißmaschinen treten erhebliche Abweichungen bei den Signalen der Dehnungsmeßstreifen auf, wenn die Probe nur gering belastet wird. Diese geringe Meßgenauigkeit macht es schwierig, den Beginn der Spannungs-Dehnungs-Kurve genau zu erkennen, und in der Regel wird eine Vorbelastung empfohlen, um die Probe auszurichten und in der Einspannvorrichtung festzuziehen. Selbst mit Vorbelastung werden aber die anfänglichen Meßwerte der Dehnungsmeßstreifen von der Probenform und der Ausrichtung der Einspannvorrichtung beeinflusst.

Wenn der Zugstab nicht exakt ausgerichtet ist, kommt es zu einer Reibung in den Backen der Einspannvorrichtung,

wodurch eine Seite der Probe stärker als die andere belastet wird. Dies kann Meßfehler oder Streuungen verursachen, so daß die Zahl der Einzelmessungen erhöht werden muß, um einen genauen Mittelwert zu erhalten. Um die ungleichmäßige Belastung auszugleichen, können Mehrfach-Dehnungsmeßstreifen oder Extensometer, die um den Stab verteilt werden, Verwendung finden und so eine genauere Messung des ersten Dehnungsbereichs erlauben; sie sind aber unbequem zu handhaben.

Das übliche Verfahren, um den E-Modul zu bestimmen, besteht darin, daß von Hand eine Ausgleichsgerade durch die aufgezeichnete Spannungs-Dehnungs-Kurve gezogen wird. Dieses Verfahren ist natürlich subjektiv und vom Werkstoffprüfer abhängig. Die Daten können über einen Computer aufge-

nommen und ausgewertet werden, wodurch der Bedienerinfluß und die beim Auswerten von Hand entstehenden Fehler bei der Festlegung des E-Moduls ausgeschaltet werden.

### Nichtlineare Spannungs-Dehnungs-Kurven

Das grundsätzliche Verfahren zum Bestimmen des Moduls besteht darin, daß die Steigung der Spannungs-Dehnungs-Kurve im linearen Bereich zu Beginn der einachsigen Zugbelastung berechnet wird. Dies ist ein einfaches und direktes Verfahren, das bei Stählen und anderen Legierungen geeignet ist, bei denen die Steigung im Prinzip bis zum Erreichen der Proportionalitätsgrenze konstant bleibt. Bei Gußeisenwerkstoffen ist allerdings die Steigung im linearen Bereich des Spannungs-Dehnungs-Diagramms häufig nicht wirklich linear, wie aus Bild 2, rechts, ersichtlich ist. Die Krümmung der Kurve stellt ein erhebliches Meßproblem bei der Bestimmung der Steigung dar, anhand derer die Steifigkeit oder der E-Modul des Werkstoffs sowie seine Streckgrenze festgelegt werden sollen.

### Abschätzen der Steigung und die Auswirkungen auf die Streckgrenze

Die Steigung der Spannungs-Dehnungs-Kurve stellt bei der Festlegung der Streckgrenze eines Werkstoffs einen wichtigen Faktor dar. Die Spannung, bei der ein Werkstoff mit stetigem Übergang, das heißt ohne ausgeprägte Streckgrenze, sein Verhalten von elastisch zu plastisch ändert, ist nicht leicht festzustellen. Daher wird in der Regel

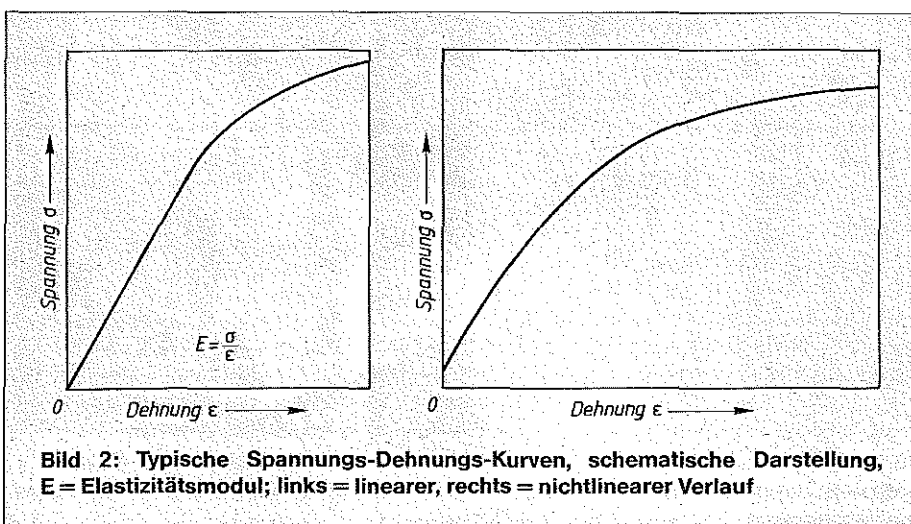


Bild 2: Typische Spannungs-Dehnungs-Kurven, schematische Darstellung, E = Elastizitätsmodul; links = linearer, rechts = nichtlinearer Verlauf

eine technische Dehngrenze als Abweichung von der Geraden ermittelt [9]. Bei diesem Verfahren wird durch einen Punkt auf der X-Achse (Dehnungsachse) eine Linie parallel zum Beginn der Spannungs-Dehnungs-Kurve gezeichnet, und die Spannung, bei der sie die Kurve schneidet, wird als Dehngrenze bezeichnet. Üblich ist es, den Punkt auf eine Dehnung von 0,2% zu legen, was die 0,2%-Dehngrenze ergibt. In gleicher Weise können zum Beispiel auch die 0,1%- oder die 1%-Dehngrenze definiert werden.

Bei einer nichtlinearen Spannungs-Dehnungs-Kurve kann die Unsicherheit beim Festlegen der Steigung der Kurve die Höhe der Dehngrenze erheblich beeinflussen. So wird zum Beispiel eine niedrigere Dehngrenze ermittelt, wenn die Steigung aus dem ersten Teil der Kurve bestimmt wird, während sich, wenn die Steigung nach einer Tangente an die Spannungs-Dehnungs-Kurve bei größerer Spannung ermittelt wird, ein erheblich höherer Wert ergibt.

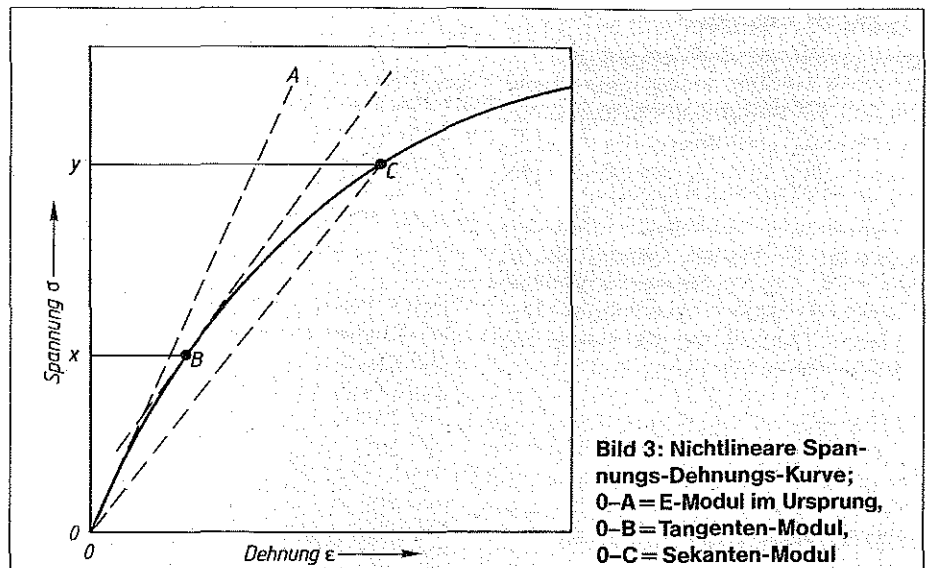
### Das Tangenten- und Sekanten-Verfahren

Nach Bild 3 sind, wenn eine nichtlineare Spannungs-Dehnungs-Kurve vorliegt, im Prinzip drei Verfahren möglich, um einen E-Modul zu bestimmen [10]. Es gibt den E-Modul im Ursprung, den Tangenten-Modul und den Sekanten-Modul.

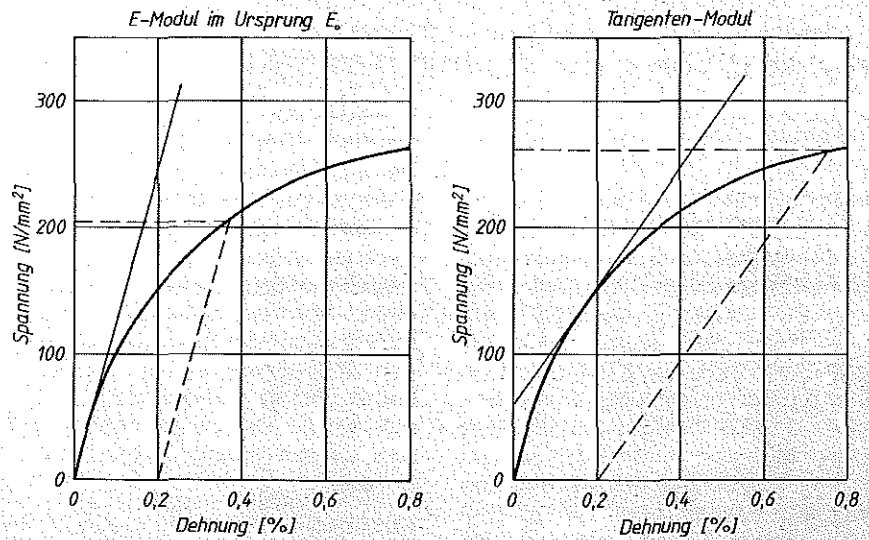
Der E-Modul im Ursprung  $E_0$  ist die Steigung der Kurve 0-A durch den Anfangspunkt der Spannungs-Dehnungs-Kurve, das heißt bei Dehnung und Spannung Null. Der Tangenten-Modul bei der Spannung  $x$  entspricht der Steigung der Kurve im Punkt B. Der Sekanten-Modul bei der Spannung  $y$  ergibt sich aus der Steigung der Geraden 0-C. Der Tangenten-Modul hängt von der Spannung ab, bei dem er ermittelt wird, da die an die Kurve gelegte Tangente ihre Steigung in Abhängigkeit von der Spannung stetig verändert.

Für Werkstoffe mit einer nichtlinearen Spannungs-Dehnungs-Kurve wie etwa Gußeisen sind nach ASTM E111-82 [11] sowohl die Bestimmung des Tangenten- als auch des Sekanten-Moduls zulässig.

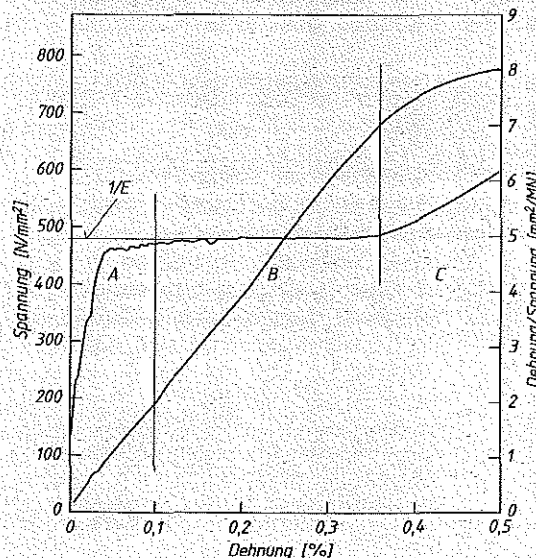
Aus Bild 3 wird deutlich, daß sich bei jedem Verfahren, bei dem der E-Modul bei einer bestimmten Spannung, die größer als Null ist, ermittelt wird, ein niedrigerer Wert ergibt als beim E-Modul im Ursprung. Ein niedriger E-Modul führt entsprechend zu einem höheren Wert der Dehngrenze, wie in Bild 4 gezeigt. Bei Verwendung des E-Moduls im



**Bild 3:** Nichtlineare Spannungs-Dehnungs-Kurve; 0-A = E-Modul im Ursprung, 0-B = Tangenten-Modul, 0-C = Sekanten-Modul



**Bild 4:** Vergleich der mit verschiedenen definierten E-Moduln ermittelten Werte für die 0,2%-Dehngrenze; links = E-Modul im Ursprung,  $\sigma_{0,2} = 214 \text{ N/mm}^2$ ; rechts = Tangenten-Modul bei einer Spannung von  $137 \text{ N/mm}^2$ ,  $\sigma_{0,2} = 276 \text{ N/mm}^2$



**Bild 5:** Spannungs-Dehnungs-Kurve eines kaltgewalzten Kohlenstoffstahls sowie hyperbolische Darstellung der Werte; daraus läßt sich der E-Modul mit  $208,7 \text{ kN/mm}^2$  bestimmen; A = Anfangsbereich, B = elastischer Bereich, C = plastischer Bereich

Ursprung ( $E_0$ ) beträgt die 0,2%-Dehngrenze  $214 \text{ N/mm}^2$ , bei Verwendung des Tangenten-Moduls, der bei einer Spannung von  $137 \text{ N/mm}^2$  an die Kurve gelegt wurde,  $276 \text{ N/mm}^2$ .

### Der hyperbolische E-Modul

Zur Auswertung und Interpretation der Spannungs-Dehnungs-Kurve von Gußeisen wird ein verbessertes Verfahren untersucht und vorgeschlagen [12], das zuerst von Tiefbauingenieuren bei bodenmechanischen Untersuchungen angewandt wurde [13]. Statt die Stei-

gung der Kurve des linearen Bereichs im normalen Spannungs-Dehnungs-Diagramm zu berechnen, wird eine hyperbolische Darstellung benutzt. Sie wird erhalten, wenn die Dehnung in der üblichen Weise als Abszisse aufgetragen wird, aber als Ordinate das Verhältnis Dehnung zu Spannung dient (Bild 5). In der hyperbolischen Darstellung tritt ein Plateau auf, das zur genauen Bestimmung des E-Moduls dienen kann. Der E-Modul wird aus dem Kehrwert des durchschnittlichen Spannungs-Dehnungs-Verhältnisses

des Plateaus errechnet. Nach diesem Verfahren ist eine Bestimmung des E-Moduls auch dann möglich, wenn bereits von Anfang an ein nichtlinearer Verlauf der Spannungs-Dehnungs-Kurve vorliegt.

Die hyperbolische Kurve ist im Prinzip eine umgekehrte Ableitung der Spannungs-Dehnungs-Kurve, das heißt  $d(\text{Spannung})/d(\text{Dehnung})$  gegen Dehnung. Beide Darstellungsarten zeigen im elastischen Bereich das gleiche Verhalten, das heißt ein Plateau mit fast konstanter Steigung.

## Ermittlung der Spannungs-Dehnungs-Kurven von Gußeisenwerkstoffen

### Einfluß des Gefüges auf die Spannungs-Dehnungs-Kurve

Die E-Moduln der Bestandteile der Grundmasse von Gußeisen und Stahl, das heißt Ferrit, Perlit, Zementit und Phosphideutektikum, haben alle

Bereits bei relativ niedrigen Spannungen, die noch unterhalb der Dehngrenze im elastischen Bereich der Spannungs-Dehnungs-Kurve liegen, kommt es zu einer Trennung an der Grenzfläche zwischen Graphit und Grundmasse. Dies tritt sowohl bei Lamellen- als auch bei Kugelgraphit (Bild 6) auf. Eine weitere Steigerung der Belastung führt

### Einfluß von Gefügekennwerten auf den E-Modul

Der Kompaktheitsgrad des Graphits wirkt sich auf die Höhe der örtlichen Spannungskonzentrationen an der Grenzfläche Graphit/Grundmasse aus. Daher muß man in einer Betrachtung über den Einfluß von Graphit auf den E-Modul die Ausbildungsform, die Verteilung und die Größe der Graphitabscheidungen berücksichtigen. Die Ausbildung der Grundmasse beeinflusst ebenfalls die Höhe der Spannungen, bei denen die örtliche plastische Verformung einsetzt, sowie das Ausmaß der Mikroverformung, ehe eine allgemeine Verformung oder Mikrorisse auftreten.

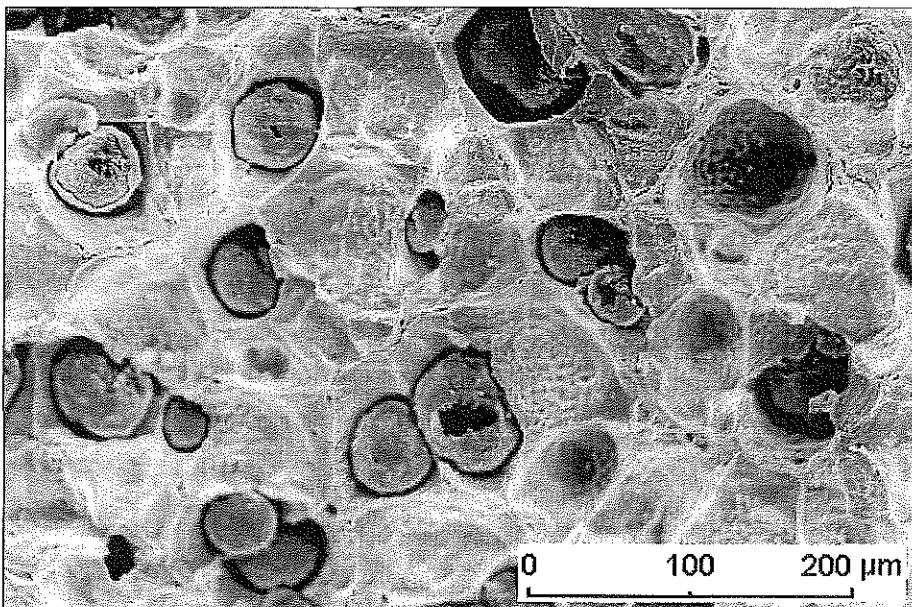


Bild 6: Anfangsstadium der Graphitablösung bei einem ferritischen Gußeisen mit Kugelgraphit und örtliche plastische Verformungen, REM-Aufnahme

etwa den gleichen Wert von rund  $210 \text{ kN/mm}^2$ . Es ist die Anwesenheit von Graphit in Form von Lamellen oder Kugeln, die das Spannungs-Dehnungs-Verhalten von graphitischen Gußeisenwerkstoffen stark beeinflusst. Die Unterbrechung der metallischen Grundmasse durch den Graphit vermindert den wirksamen E-Modul um einen Betrag, der von der Ausbildung und der Menge dieser Unterbrechungen abhängt [14].

zu einer Spannungskonzentration mit örtlichen plastischen Verformungen der Grundmasse an der Graphit-Matrix-Grenzfläche. Um die Kugeln kann es dabei zu einer erheblichen plastischen Verformung kommen, obwohl die übrige Grundmasse nur elastisch verformt wird. Diese Verformung im Mikrobereich eines Kompositwerkstoffes ist die Hauptursache der Krümmung der Spannungs-Dehnungs-Kurve, die bei graphitischen Gußeisen zu beobachten ist.

### Einfluß des Graphits

#### Graphitausbildung

Bei grauen Gußeisen haben die Ausbildungsform, die Verteilung und die Größe der Graphitabscheidungen einen unmittelbaren Einfluß auf den E-Modul. Die Form des Graphits ist eine wesentliche Einflußgröße auf den E-Modul. Die kugelige Form des Graphits in Gußeisen mit Kugelgraphit verursacht geringere Spannungskonzentrationen in der Grundmasse als der Lamellengraphit in Grauguß. Diese Spannungskonzentrationen führen dazu, daß die Grundmasse im Mikrobereich um die Graphitteilchen sich bereits lange verformt hat, ehe eine makroskopische Verformung der Probe sichtbar wird. Dieser Effekt ist besonders ausgeprägt, wenn der Graphit von Ferrit umgeben ist. Ein fast perfekt ausgebildeter Kugelgraphit, eine kleinere Kugelgröße und eine gleichmäßige Verteilung der Kugeln tragen zu höheren Werten des E-Moduls bei.

Wenn die Kugelzahl ansteigt, führt dies zu einem Rückgang der Mikroverformungen. Dieser Effekt hat zur Folge, daß der elastische Bereich der Spannungs-Dehnungs-Kurve sich trotz des höheren Ferritgehalts etwas mehr einer echten Geraden annähert.

Eine niedrigere Spannung um die Graphitkugeln wird die Wahrscheinlichkeit, daß die örtliche Spannungskonzentration die Streckgrenze der die Kugel umgebenden Grundmasse übersteigt, vermindern. Dies gilt sowohl für Gefüge mit ferritisch-perlitischer als auch für vollständig ferritische Grundmasse.

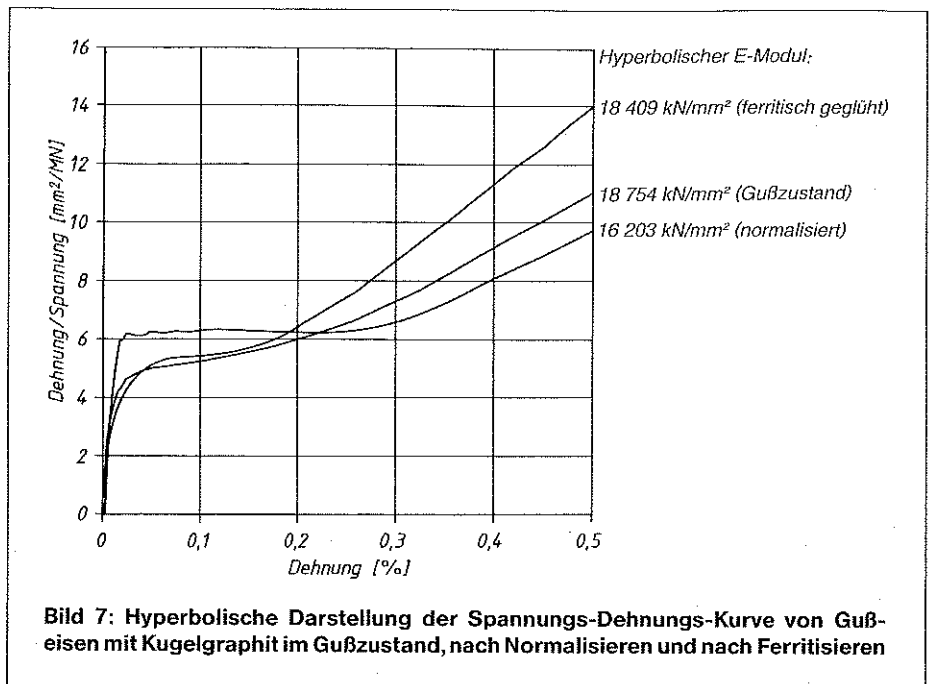
#### Graphitvolumen

Das Graphitvolumen hängt in erster Linie vom Kohlenstoffgehalt ab. Die Festigkeit des Graphits ist im Vergleich zu der der Grundmasse zu vernachlässigen. Eine geringere Graphitmenge erhöht den E-Modul. Bei einem typischen Gußeisen mit Kugelgraphit macht der Volumenanteil des Graphits in Form von Kugeln etwa 10% aus. Dieser hohe Graphitanteil senkt die Festigkeit des Gesamtgefüges und begünstigt auch die Bildung von Mikrorissen, da der Graphit zu Spannungsspitzen führt. Parallel zur Bildung von Spannungsspitzen um den Kugelgraphit, die örtlich plastische Verformungen verursachen, wird der E-Modul auch dadurch herabgesetzt, daß der tragende Querschnitt des Werkstoffs durch den Graphitanteil um 10% vermindert wird. Dies ist die Erklärung dafür, daß der E-Modul von Gußeisen mit Kugelgraphit um 20 bis 30% niedriger als der von Stahl ist. Eine Folge ist, daß ein Verringern des Graphitanteils den E-Modul erheblich steigert.

#### Grundmasse

Bei einer gegebenen Graphitausbildung hängt die Linearität der Spannungs-Dehnungs-Kurve auch von der Ausbildung der Grundmasse ab.

Bei Stählen hat eine veränderte Grundmasse keinen oder nur einen äußerst schwachen Einfluß auf den E-Modul. Wenn das Gefüge aber Graphitteilchen in Form von Lamellen oder Kugeln enthält, verursachen bereits geringe Spannungen merkliche plastische Verformungen der Grundmasse an der Grenzfläche zum Graphit. Wenn der Graphit von einem Gefügebestandteil mit geringerer Festigkeit, wie Ferrit, umgeben ist, tritt die Mikroverformung lange vor der erkennbaren Verformung der Probe auf. Daher kann man einen niedrigeren E-Modul sowie ein kürzeres Plateau in der hyperbolischen Darstellung erwarten.



**Bild 7: Hyperbolische Darstellung der Spannungs-Dehnungs-Kurve von Gußeisen mit Kugelgraphit im Gußzustand, nach Normalisieren und nach Ferritisieren**

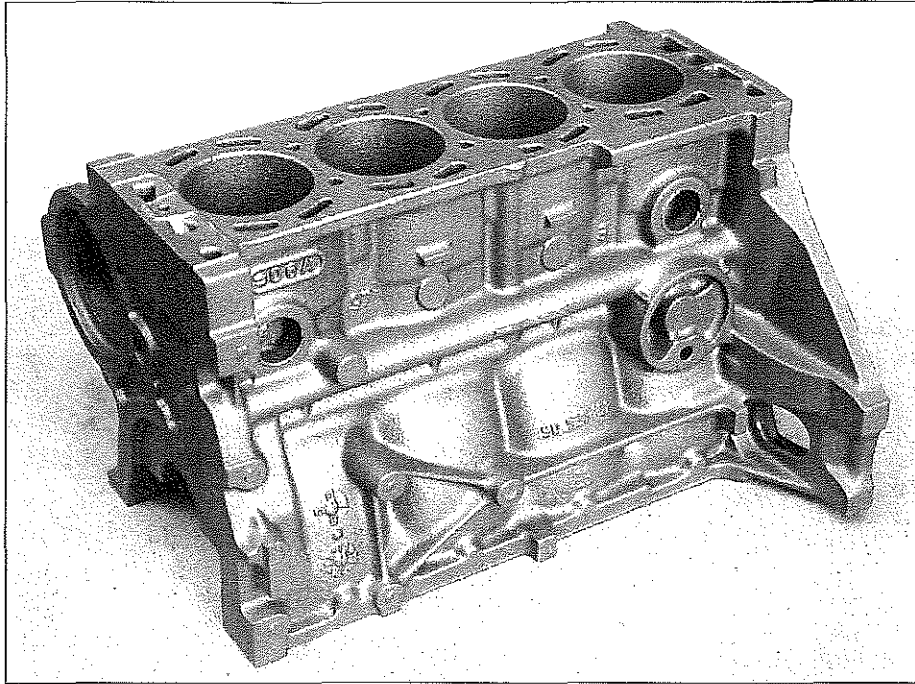
ten. In Bild 7 werden drei verschiedene Sorten von Gußeisen mit Kugelgraphit verglichen. Bei dem normalisierten Werkstoff, der eine völlig perlitische Grundmasse besitzt, ist ein gut ausgebildetes, langes Plateau zu erkennen. Bei den beiden Proben, die im Gußzustand oder im geglähten Zustand vorliegen und teilweise oder vollständig ferritisch sind, wird das Plateau mit steigendem Ferritgehalt deutlich kürzer. Dies deutet darauf hin, daß sich der E-Modul auch im elastischen Bereich allmählich ändert. Die Flachheit und die Länge des Plateaus hängen bei Gußeisen mit Kugelgraphit in erster Linie von ihrer Grundmasse ab.

Die Auswirkungen der aufgebrachten Spannung auf die Grundmasse verschiedener Gußeisensorten mit Kugelgraphit sollen in den folgenden Ausführungen zusammengefaßt werden:

- **Gleichmäßig ferritische Grundmasse**  
Um die Graphitkugeln entsteht, wenn der Werkstoff belastet wird, eine starke örtliche plastische Verformung, die eine Ablösung der Grundmasse vom Graphit verursacht. Danach bilden sich Mikrorisse, die leicht abgerundete Spitzen ausbilden, ehe sie weiter wachsen.
- **Ferritische Grundmasse mit Perlit in den Korngrenzen**  
Das Verhalten ist ähnlich wie bei Sorten mit gleichmäßig ferritischer Grundmasse, mit der Ausnahme, daß bei der Verformung einer Grundmasse mit Perlit dessen begrenzte Verformbarkeit zur Bildung von Mikroris-

sen führt, die dann in den umliegenden Ferrit wachsen. Die Risse weisen stumpfe Spitzen auf, bis die Verformung so hoch wird, daß sie durch den Ferrit in den Perlit wachsen können.

- **Vollständig perlitische Grundmasse**  
Hier kann eine lineare Spannungs-Dehnungs-Kurve beobachtet werden, da kein weicher Ferrit vorliegt, der an der Grenzfläche Graphit/Grundmasse bereits bei niedrigen Spannungen zu Verformungen führt. Eine örtliche Verformung des Perlits um den Graphit erfordert erheblich höhere Spannungen. Die Verformungskonzentration in der Grenzfläche Perlit/Graphit, bei der sich Mikrorisse bilden, ist wesentlich niedriger als bei ferritischer Grundmasse.
- **Vergütete Grundmasse**  
Diese hochfeste Grundmasse macht die Spannungs-Dehnungs-Kurve weitgehend linear, ähnlich wie bei perlitischem Gefüge. Eine gleichmäßige Verformung setzt erst bei noch höheren Spannungen als bei Perlit ein.
- **Bainitische Grundmasse**  
Bei bainitischem Gußeisen mit Kugelgraphit (ADI, austenitisch-ferritische Grundmasse) kann es in den spröden Seigerungszone in den Korngrenzenbereichen sehr früh zu Anrissen kommen. Das Rißwachstum sowie die Rißeinleitung an der Grenzfläche Grundmasse/Graphit werden jedoch durch die hohe Festigkeit und Zähigkeit (Fähigkeit zum Stoppen von Rissen) des Ferrits begrenzt.



**Bild 8:** Dank seines großen E-Moduls lassen sich mit Gußeisen mit Lamellengraphit Kfz.-Motorblöcke mit hoher Steifigkeit und geringer Wanddicke herstellen (Bild: Eisenwerk Brühl, Brühl)

## Diskussion

Die in Gußeisenwerkstoffen bei typischerweise relativ niedrig gemessenen Spannungen und Verformungen – also zu früh – einsetzende plastische Verformung führt zu Werkstoffen, die weder einen E-Modul im üblichen Sinne besitzen noch eine Proportionalitätsgrenze, die vor einer dauernden Verformung gemessen werden kann.

## Verhalten im Betrieb

Werden Bauteile aus Gußeisenwerkstoffen mit Spannungen belastet, die einen erheblichen Prozentsatz ihrer Streckgrenze erreichen, das heißt im Bereich von 50% der Streckgrenze, treten im Mikrogefüge Fließvorgänge auf. Wenn diese Bauteile mehrmals mit der gleichen Belastung beansprucht werden, wird der Einfluß des ersten Mikrofließens mit steigender Zahl der Beanspruchungen vermindert, so daß sich der Anfang der Spannungs-Dehnungskurve stabilisiert und bei einem neuen E-Modul eine mehr lineare Form annimmt. Jetzt hat sich ein Betriebsgefüge eingestellt, in dem örtlich Bereiche mit plastischer Verformung vorliegen, die die Eigenschaften des gesamten Werk-

stoffs ändern. Ein solches Bauteil ist jetzt in einem Zustand, in dem es einen Betriebsmodul aufweist, der sich von dem ursprünglichen E-Modul unterscheidet. Dieser Betriebsmodul vermittelt in ähnlicher Weise wie die Betriebsfestigkeit ein wesentlich genaueres Bild von dem Verhalten des Bauteils unter Betriebsbedingungen. Die Bestimmung des Betriebsmoduls kann nicht im Labor mit einer einzelnen Belastung im Rahmen eines üblichen Zugversuchs durchgeführt werden.

## Auswirkung bei realen Bauteilen

Wenn sich die Bauteile im Betrieb befinden, tritt häufig eine Kaltverfestigung beziehungsweise eine plastische Verformung im Mikrobereich bei Belastungen auf, die deutlich unter der Streckgrenze des Werkstoffs liegen. Schwächere Bereiche des Gefüges werden durch diese örtliche plastische Verformung verfestigt. Der Einfluß der lokalen Spannungskonzentrationen am Graphit wird abgeschwächt. Dabei ist es die maximale Belastung, mit der das Bauteil beansprucht wird, die für sein weiteres Betriebsverhalten und die Steigerung der lokalen Verformungen bei den folgenden Spannungszyklen ausschlag-

gebend ist. Diese Eigenheit kann eine Ursache dafür sein, daß sich Bauteile aus Gußeisenwerkstoffen im Betrieb gewöhnlich besser bewähren, als man aus den Ergebnissen einfacher Laboruntersuchungen, insbesondere den Zugfestigkeitseigenschaften, ableiten kann, da letztere keine Hinweise auf das Verhalten im Betrieb geben.

## Schrifttum

- [1] Boyes, W. H., L. T. Russel und G. T. Suter: *Mechanics of Engineering Materials*. John Wiley & Sons, 1984
- [2] Speich, G. R., A. J. Schwoeble und B. I. Kapadista: Elastic Moduli of Gray and Nodular Cast Iron. *Trans. of ASME, Journal Applied Mechanics* 47 (1980), S. 82
- [3] Hashin, Z.: *ASME, Journal Applied Mechanics* 29 (1962), S. 43
- [4] Wu, T. T.: *International Journal of Powder Metallurgy* 1 (1965), S. 8
- [5] Rossi, R. C.: *Journal of the American Ceramic Soc.* 51 (1965), S. 433
- [6] Kovacs, B. V., und G. S. Cole: In *Proceedings of the Second International Symposium on Cast Iron*, Genf, 1975, S. 17 bis 195
- [7] Kovacs, B. V., und G. S. Cole: On the Interaction of Acoustical Waves with Cast Iron. *Trans. Amer. Foundry Soc.* 83 (1975), S. 497 bis 502
- [8] Kovacs, B. V.: Quality Control and Assurance by Sonic Resonance in Ductile Iron Castings. *Trans. Amer. Foundry Soc.* 85 (1977), S. 499
- [9] DIN 50145
- [10] Davis, H. E., G. E. Troxell und G. F. V. Hauck: *The Testing of Engineering Materials*. McGraw Hill, 1982
- [11] ASTM E111-82: Standard Test Method for Young's Modulus, Tangent Modulus and Chord Modulus
- [12] Fang, L. Y., K. Metzloff, R. C. Voigt und C. R. Loper, Jr.: Factors Affecting the Measurement of the Modulus of Elasticity of Ductile Irons. *Trans. Amer. Foundry Soc.* 103 (1995), Paper 095-012
- [13] Kondner, R. T.: Hyperbolic Stress-Strain Response: Cohesive Soils. *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, Proc. ASCE* 89 (1963) SM S. 115
- [14] Angus, H. T.: *Cast Iron: Physical and Engineering Properties*. 2. Aufl., London, 1976

# Bestimmung der elastischen Konstanten von Gußeisenwerkstoffen

Herrn Prof. Dr.-Ing. Otto Liesenberg anlässlich seines 70. Geburtstages gewidmet

## Einleitung

Die Kenntnis der elastischen Konstanten von Gußeisenwerkstoffen ist eine wichtige Voraussetzung für die beanspruchungsgerechte Auslegung von Gußteilen, wobei, ausgehend von den in der Praxis überwiegend auftretenden Zugbeanspruchungen, dem Elastizitätsmodul eine vorrangige Bedeutung zukommt.

Bei der experimentellen Bestimmung des Elastizitätsmoduls von Gußeisenwerkstoffen sind zwei wichtige Aspekte zu beachten, welche die Genauigkeit der Messung beziehungsweise die exakte Definition dieses Werkstoffkennwertes entscheidend beeinflussen können, nämlich

- Fehlen eines genormten Prüfverfahrens zur Ermittlung des Elastizitätsmoduls und
- möglicher nichtlinearer Verlauf der Spannungs-Dehnungs-Kurve im elastischen Bereich.

Für die metallischen Werkstoffe gibt es im Gegensatz zu Kunststoffen [1], monolithischer Keramik [2], Beton [3] und Holz [4] kein genormtes Verfahren zur Ermittlung des Elastizitätsmoduls auf der Basis der DIN- beziehungsweise EN-Normen. Zurückgegriffen wird deshalb im Einzelfall auf ASTM E 111-97 [5]. Die Bestimmung des Elastizitätsmoduls erfolgt häufig, in Verbindung mit dem Zugversuch nach DIN EN 10 002 [6] unter Zugrundelegung eines ideal-linearen Spannungs-Dehnungs-Verlaufs, aus dem Anstieg der Kurve im elastischen Bereich (Bild 1, links). Die Auswertung eines 1998 durchgeführten Ringversuchs mit 91 europäischen Prüflaboratorien zur Durchführung des Zugversuchs nach DIN EN 10 002 am Stahl 115CrV3 [7] ergab ein unverträglich breites Streuband für den Elastizitätsmodul. Eine ausführliche Bewertung der meßtechnischen Voraussetzungen für die Kraft- und Dehnungsmessung zur genauen Ermittlung des Elastizitäts-

moduls im Zugversuch bei vergleichen-der Gegenüberstellung unterschiedlicher Verfahren zur Bestimmung des Anstieges der Spannungs-Dehnungs-Kurve wird in [8] und [9] gegeben. Als mögliche Ursachen für die festgestellten Streuungen der Meßwerte für den Elastizitätsmodul in den unterschiedlichen Prüflaboratorien wird neben der fehlenden genormten Versuchsdurchführung und -auswertung vor allem die unzureichende Überprüfung des Ergebnisses der rechnergestützten, automatisierten Auswertung angeführt. Weiter muß die Meßfrequenz so gewählt werden, daß für die durchzuführende Approximation 25 bis 100 Meßwertpaare zur Verfügung stehen [8]. Meßfehler infolge eines versuchsbedingten nicht-linearen Spannungs-Dehnungs-Verlaufs (Bild 1, Mitte) werden von der Probenform und -einspannung sowie dem Dehnungsaufnehmersystem bestimmt.

Neben dem Einfluß des Prüfverfahrens muß zusätzlich bei Gußeisenwerkstoffen der mögliche nichtlineare Verlauf der Spannungs-Dehnungs-Kurve im elastischen Bereich (Bild 1, rechts) beachtet werden, der aus gefügebedingten lokalen plastischen Verformungen

resultiert. Aus der Vielzahl der hierzu vorliegenden Veröffentlichungen sei auf die zusammenfassenden Beiträge von H. STROPPE und H. HOFFMANN [10, 11], E. NECHTELBERGER [12] und D. LÖHE [13 bis 15] verwiesen.

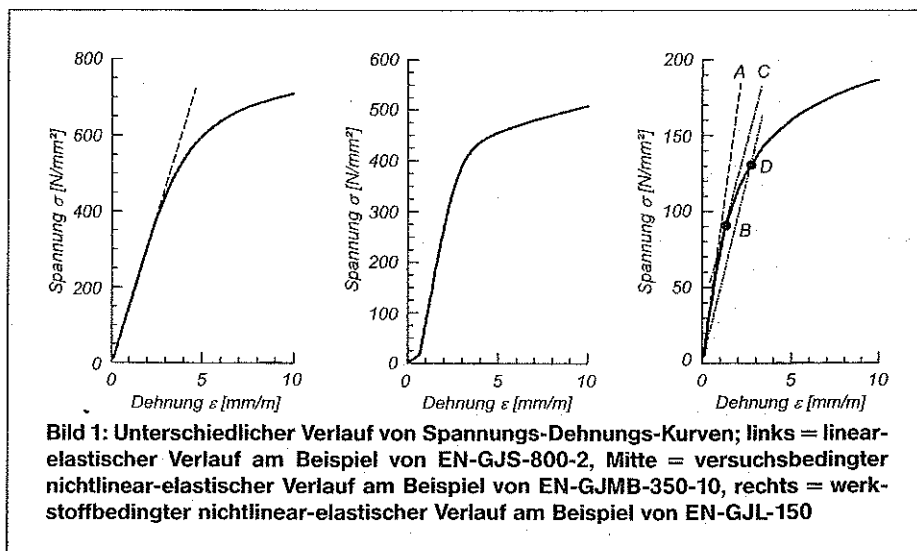
Hieraus folgt, daß der Elastizitätsmodul von Gußeisenwerkstoffen außer vom Grundgefüge und der Temperatur noch in besonderem Maße von Form und Anteil des Graphits sowie von Art und Größe der Beanspruchung bestimmt wird (Bild 2). Die Abhängigkeit des Elastizitätsmoduls von der Graphitmorphologie wird in [13] über die Einführung eines modifizierten Gestaltskoeffizienten  $\eta$

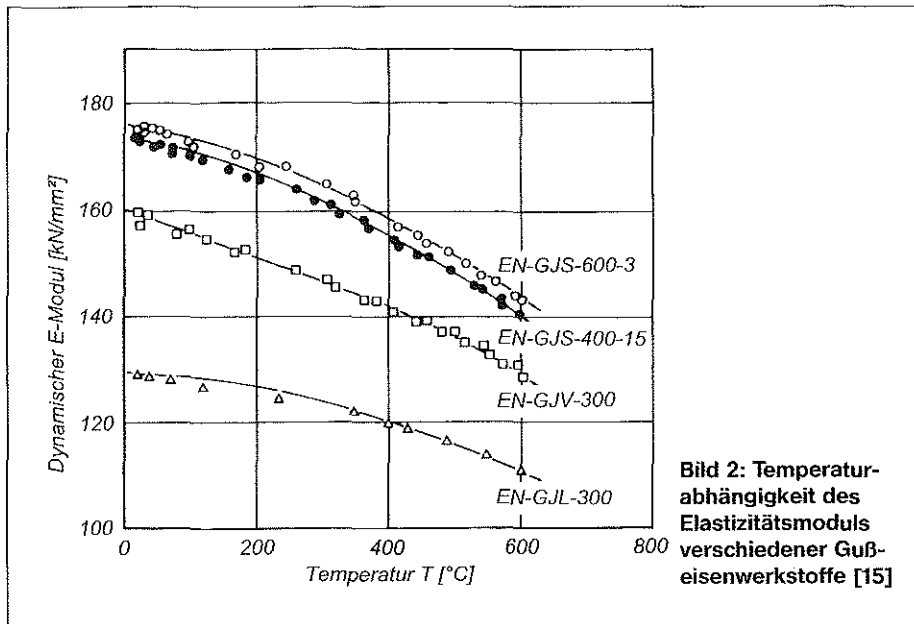
$$\eta = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{S_{\max}^2}{A} \quad (1)$$

bestimmt. Dieser ergibt sich aus der Fläche  $A$  und der maximalen Sehnenlänge  $S_{\max}$  der Schnittfläche des Graphitteilchens und wird in [16] auch über den Graphitmorphologieparameter  $W$

$$W = \frac{4}{\pi} \cdot \eta \cdot V_G \quad (2)$$

unter Einbeziehung des Graphitvolumenanteils  $V_G$  definiert.





**Bild 2: Temperaturabhängigkeit des Elastizitätsmoduls verschiedener Gußeisenwerkstoffe [15]**

Das gefügebedingte nichtlineare Spannungs-Dehnungs-Verhalten graphitischer Gußeisenwerkstoffe und der hieraus resultierende Einfluß auf den Elastizitätsmodul war der Ausgangspunkt sowohl für unterschiedliche Definitionen des Elastizitätsmoduls als auch für den Einsatz unterschiedlicher Meßmethoden. Bild 1, rechts, zeigt am Beispiel des Gußeisens mit Lamellengraphit die nach [5] mögliche Definition des Elastizitätsmoduls bei Vorliegen einer nichtlinearen Spannungs-Dehnungs-Kurve. Während der  $E_0$ -Modul über den Anstieg 0-A im Ursprung der  $\sigma$ - $\epsilon$ -Kurve ( $\sigma \rightarrow 0$ ) bestimmt wird, erfolgt die Ermittlung des Tangenten- und Sekanten-Moduls über den Anstieg B-C beziehungsweise 0-D für die entsprechende Belastung. Darüber hinaus wird in [17] im Ergebnis einer weitergehenden Interpretation der  $\sigma$ - $\epsilon$ -Kurven von Gußeisenwerkstoffen die Definition eines hyperbolischen Elastizitätsmoduls vorgeschlagen, der sich aus dem Anstieg einer  $\epsilon/\sigma$ -Kurve ergibt.

### Meßmethoden

Neben der experimentellen Bestimmung statischer Elastizitätsmoduln über die Aufnahme von Kraft-Weg-Kurven im Zug-, Druck- oder Biegeversuch kommen bei Gußeisenwerkstoffen zur Ermittlung dynamischer Elastizitätsmoduln häufig auch zerstörungsfreie Prüfmethoden zum Einsatz. Dabei ist bei der dynamischen Bestimmung der elastischen Konstanten über die Messung der Ultraschallgeschwindigkeit oder der Resonanzfrequenz im Vergleich zu den statischen Verfahren zu beachten, daß es sich hierbei um grundsätzlich verschiedene Methoden handelt. Der

Vorteil der dynamischen Meßmethoden besteht insbesondere in der Vermeidung überelastischer Verformungen des Werkstoffs. Im Rahmen der eigenen Messungen erfolgte die Bestimmung des statischen Elastizitätsmoduls über den Anstieg der  $\sigma$ - $\epsilon$ -Kurve unter Beachtung der oben genannten Prüfparameter und des gefügeabhängigen  $\sigma$ - $\epsilon$ -Verhaltens. Feindehnungsmessungen an einer Zugprobe aus EN-GJMB-350-10 ( $R_{p0,2} = 213 \text{ N/mm}^2$ ) zeigten eine Abweichung der  $\sigma$ - $\epsilon$ -Kurve vom linearen Verlauf bei etwa  $0,5 R_{p0,2}$ . Die Bestimmung des statischen Elastizitätsmoduls über eine zehnmalige Be- und Entlastung im linearen Bereich ( $50 \text{ N/mm}^2 < \sigma < 100 \text{ N/mm}^2$ ) ergab Werte im Bereich von  $(160 \text{ bis } 175) \text{ kN/mm}^2$  und einen Mittelwert von  $(166 \pm 5) \text{ kN/mm}^2$ .

Bei der Bestimmung dynamischer Elastizitätsmoduln über die Messung der Schallgeschwindigkeit nach dem Impuls-Echo-Verfahren wurde die Zeit  $\Delta t$  zwischen aufeinanderfolgenden Rückwandechos der jeweiligen Wellenart ermittelt und über die Probendicke ( $d = 10 \text{ mm}$ ) die Geschwindigkeit der Longitudinalwelle  $c_L$  beziehungsweise der Transversalwelle  $c_T$  bestimmt.

$$c_T = \frac{2d}{\Delta t_T} \quad (3)$$

$$c_L = \frac{2d}{\Delta t_L} \quad (4)$$

Die elastischen Konstanten Elastizitätsmodul  $E$ , Schubmodul  $G$  und Poissonzahl  $\nu$  wurden bei Kenntnis der Dichte  $\rho$ , die mit einem speziellen Dichtemeßplatz bestimmt wird, gemäß [18 bis 20] nach den Gleichungen (5) bis (7) berechnet.

$$E = \rho \frac{3c_L^2 c_T^2 - 4c_T^4}{c_L^2 - c_T^2} \quad (5)$$

$$G = \rho \cdot c_T^2 \quad (6)$$

$$\nu = \frac{1}{2} \frac{c_L^2 - 2c_T^2}{c_L^2 - c_T^2} \quad (7)$$

Für die Messungen an planparallelen Proben kam der Impulsverstärker PR 5800 von Panametrics bei Verwendung von Prüfköpfen ( $\phi 12,5 \text{ mm}$ ) im Frequenzbereich von 1 bis 5 MHz zum Einsatz. Die Genauigkeit der Ultraschallmessung wurde an neun Proben aus EN-GJMB-350-10 durch Schallgeschwindigkeits- und Dichtemessungen kontrolliert. Mittelwerte und Standardabweichungen für

$$\rho = (7,22 \pm 0,04) \text{ g/cm}^3$$

$$c_T = (3071 \pm 16) \text{ m/s}$$

$$c_L = (5533 \pm 49) \text{ m/s}$$

$$\nu = 0,23 \pm 0,01$$

$$E = (174 \pm 1) \text{ kN/mm}^2 \text{ und}$$

$$G = (68 \pm 0,06) \text{ kN/mm}^2$$

beinhalten die Meßfehler und die gefügebedingten Streuungen der Meßwerte.

Bei der Ermittlung der elastischen Konstanten über die Messung der Resonanzfrequenz kam der Resonanz-Frequenz-Meßplatz „Elastotron 2000“ [21] unter Verwendung planparalleler prismatischer Proben ( $3 \text{ mm} \times 8 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$ ) unter Beachtung der in [2] festgelegten Auswertung zur Anwendung. Hierbei werden bei der Bestimmung des Elastizitätsmoduls über Biegeresonanz die an Fäden aufgehängten Proben im Frequenzbereich von 1 kHz bis 100 kHz in Schwingung gebracht und die Frequenzen bestimmt, bei denen die Amplituden deutliche Maxima zeigen. Die Berechnung des Elastizitätsmoduls erfolgt nach

$$E = 0,946 \left[ \frac{mf_f^2}{b} \right] \left[ \frac{l}{h} \right]^3 A_f \quad (8)$$

$$A_f = 1 + 6,585 \left[ \frac{h}{l} \right]^2 \quad (9)$$

mit

$m$  = Masse der Probe

$l$  = Probenlänge

$f_f$  = Resonanzfrequenz der Biegegrundschwingung (1. Mode)

$b$  = Probenbreite

$h$  = Probendicke

Der aus den Einzelmessungen resultierende Meßfehler gemäß

$$\frac{\Delta E}{E} = \sqrt{\left[\frac{\Delta E(m)}{E}\right]^2 + \left[\frac{\Delta E(h)}{E}\right]^2 + \left[\frac{\Delta E(b)}{E}\right]^2 + \left[\frac{\Delta E(l)}{E}\right]^2 + \left[\frac{\Delta E(f)}{E}\right]^2} \quad (10)$$

liegt zwischen 1,5% (austenitisches Gußeisen mit Kugelgraphit) und 0,3% (ferritisches Gußeisen mit Kugelgraphit). Der Schubmodul bei Torsionsresonanz wird nach

$$G = A_t \left[ \frac{4 \cdot l \cdot m \cdot f_t^2}{b \cdot h} \right] \quad (11)$$

$$A_t = \frac{(h/b) + (b/h)}{4(h/b) - 2,52(h/b)^2 + 0,21(h/b)^6} \quad (12)$$

mit

$f_t$  = Resonanzfrequenz der Torsionsgrundschwingung (1. Mode)

berechnet, wobei der Meßfehler analog Gleichung (10) bestimmt wird und den für den Elastizitätsmodul angegebenen Werten übereinstimmt.

## Ergebnisse

Eigene Untersuchungen am Institut für Werkstofftechnik der TU Bergakademie Freiberg zur experimentellen Bestimmung des Elastizitätsmoduls von Gußeisenwerkstoffen erfolgten im Rahmen der bruchmechanischen Bewertung des Rißeinleitungs- und Rißausbreitungswiderstandes dieser Werkstoffgruppe [22 bis 27]. Die sich hierbei bestätigenden Schwierigkeiten hinsichtlich der exakten und reproduzierbaren Ermittlung des Elastizitätsmoduls über

die Spannungs-Dehnungs-Kurve des Zugversuchs waren der Ausgangspunkt, die für verschiedene Gußeisenwerkstoffe vorliegenden Ergebnisse vergleichend mit der Bestimmung der elastischen Konstanten über die Messung der Schallgeschwindigkeit sowie der Resonanzfrequenz zu bewerten.

Bild 3 zeigt das Versuchsprogramm für die Ermittlung der elastischen Konstanten in Abhängigkeit von der Gefügeausbildung. Mit Hilfe der licht-

mikroskopischen Gefügeanalyse (Softwareprogramm Image C Matan) wurden der Graphitvolumenanteil  $V_G$ , die Graphitteilchengröße  $d_G$ , der Graphitteilchenabstand  $\lambda$  und der die innere Kerbwirkung näherungsweise charakterisierende Formfaktor  $f$  bestimmt, wobei letztgenannter über

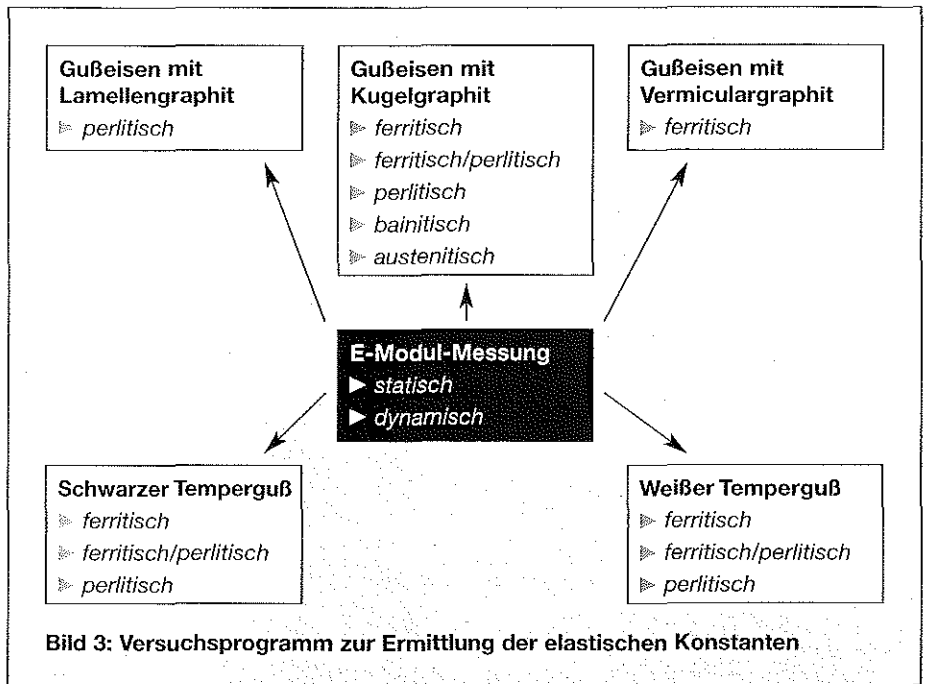
$$f = \frac{4\pi \cdot A}{U^2} \quad (13)$$

mit

A = Fläche der Teilchenschnittfigur

U = Umfang der Teilchenschnittfigur

den kreisförmigen Teilchenquerschnitt bei  $f=1$  definiert.



## Gußeisen mit Lamellengraphit

Chemische Analyse und mechanische Eigenschaften der am Gießerei-Institut der TU Bergakademie Freiberg abgegossenen Y2-Proben (Sandguß) nennen die Tabellen 1 und 2. Gefüge und Graphitmorphologieparameter sind aus Bild 4 ersichtlich. Die gemessenen elastischen Konstanten (Tabelle 3) sind mit den Angaben im Schrifttum (Tabelle 4) vergleichbar.

Aus den Ergebnissen nach [12 und 13] folgt, daß der Elastizitätsmodul (60 bis 150 kN/mm<sup>2</sup>) mit steigendem Sättigungsgrad und zunehmender Festigkeit größer wird, wobei sich oberhalb einer Zugfestigkeit von 350 N/mm<sup>2</sup> die Spannungsabhängigkeit deutlich verringert.

**Tabelle 1: Chemische Zusammensetzung und Sättigungsgrad  $S_c$  der untersuchten Gußeisen mit Lamellengraphit**

Werkstoff-Kurzzeichen	Element [Masse-%]					$S_c$ *)
	C	Si	Mn	P	S	
EN-GJL-150	3,58	1,74	0,63	0,093	0,053	0,98
EN-GJL-200	3,29	1,87	0,54	0,089	0,043	0,91

\*)  $S_c = \% C / (4,26 - 0,31 \% Si - 0,27 \% P)$

Werkstoff-Kurzzeichen	Tabelle 2: Mechanische Eigenschaften der untersuchten Gußeisen mit Lamellengraphit			
	$R_{p0,1}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$R_m$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$A_5$ [%]	HBS
EN-GJL-150	119	179	0,8	174
EN-GJL-200	156	213	0,6	193

Aus Untersuchungen zum Einfluß des Gefüges von Gußeisen mit Lamellengraphit im Festigkeitsbereich von 100 bis 400 N/mm<sup>2</sup> resultieren Werte für den Elastizitätsmodul zwischen 95 und 140 kN/mm<sup>2</sup>, wobei die komplexe Wirkung von Anteil, Form und Anordnung der Graphitteilchen beachtet werden muß [16].

Aus dem Vergleich der statischen und dynamischen Elastizitätsmoduln folgt, daß letztgenannte größer sind und nach [29] bis zu 12% höher liegen können. Dieser Effekt wird auch durch Messungen an EN-GJL-300 bei Temperaturen von 20 bis 600 °C bestätigt, wobei die im gesamten Temperaturbereich höheren dynamischen Elastizitätsmoduln darauf zurückgeführt werden können, daß bei einer dynamischen Messung mit hohen Frequenzen und niedrigen Beanspruchungen keine plastischen Verformungen im Bereich der Graphitlamellen auftreten [13, 15].

**Tabelle 3: Elastische Konstanten der untersuchten Sorten von Gußeisen mit Lamellengraphit**

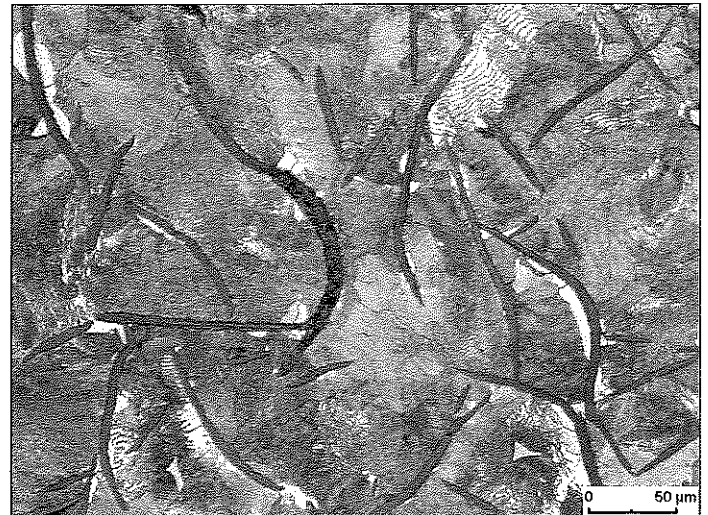
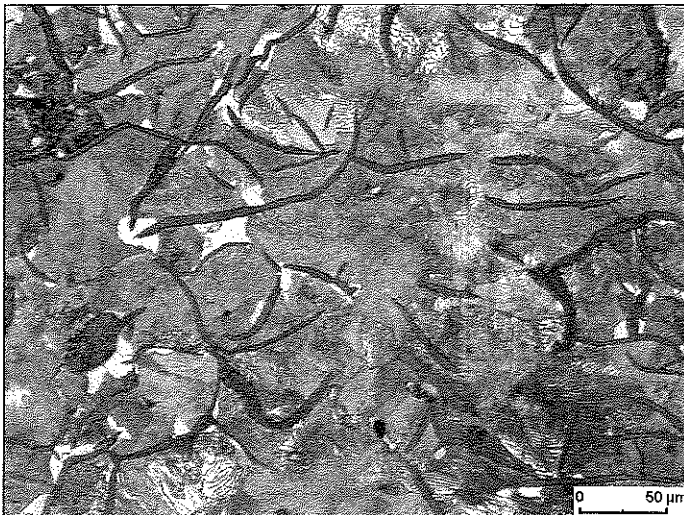
Werkstoff-Kurzzeichen	Meßmethode						
	statisch	dynamisch				Resonanzverfahren	
		Ultraschallverfahren		Resonanzverfahren		Resonanzverfahren	
E	E	G	$\nu$	E	G	$\nu$	
[kN/mm <sup>2</sup> ]	[kN/mm <sup>2</sup> ]	[kN/mm <sup>2</sup> ]		[kN/mm <sup>2</sup> ]	[kN/mm <sup>2</sup> ]		
EN-GJL-150	92	108	44	0,23	117	47	0,23
EN-GJL-200	102	127	50	0,27	130	51	0,26

**Tabelle 4: Elastizitätsmodul E und Poissonsche Konstante  $\nu$  von Gußeisen mit Lamellengraphit [28]**

Kennwert	Werkstoff-Kurzzeichen EN-GJL-...				
	150	200	250	300	350
E [kN/mm <sup>2</sup> ]	78 bis 103	88 bis 113	103 bis 118	118 bis 137	123 bis 143
$\nu$	0,25				

EN-GJL-150

EN-GJL-200

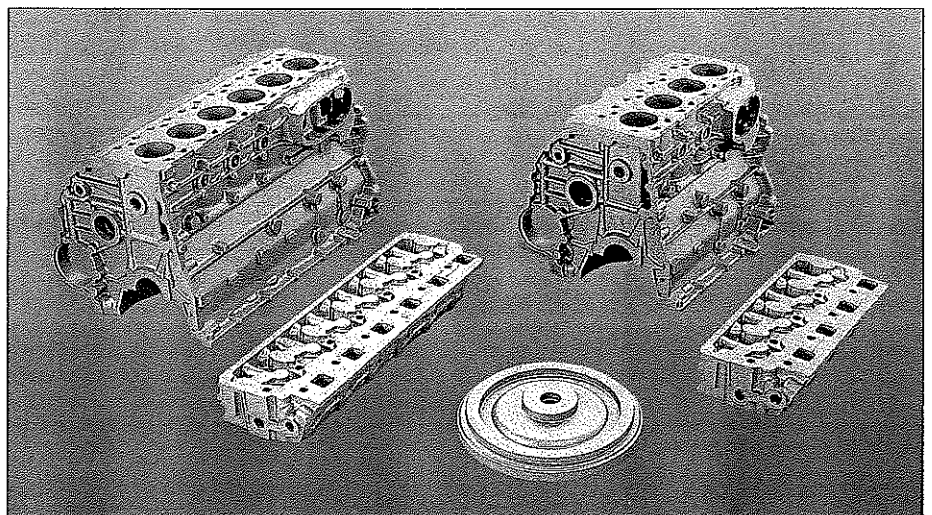


$V_G = 16\%$ , mittlere Sehnenlänge des Graphits = 6  $\mu\text{m}$

$V_G = 11\%$ , mittlere Sehnenlänge des Graphits = 7  $\mu\text{m}$

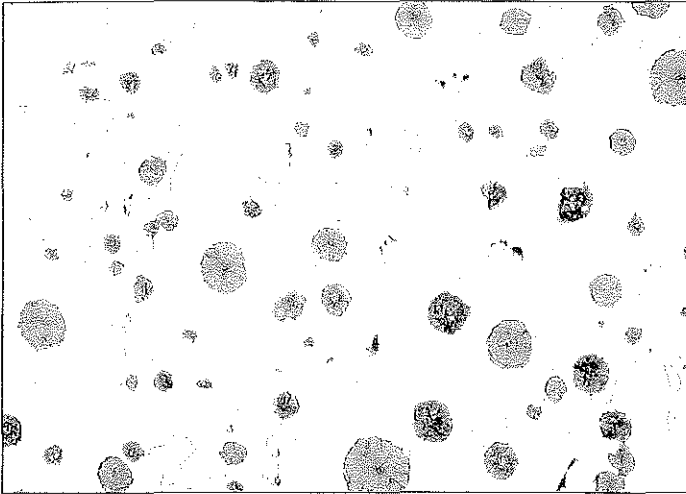
**Bild 4: Gefüge und Graphitmorphologieparameter von zwei Gußeisen mit Lamellengraphit**

**Bild 5: Zylinderkurbelgehäuse (154 kg und 217 kg) und zugehörige Zylinderköpfe (53 kg und 77 kg) sowie Schwungscheibe für Reihen-Dieselmotoren, Werkstoff: un- oder niedriglegiertes Gußeisen mit Lamellengraphit (Bild: DaimlerChrysler, Mannheim)**



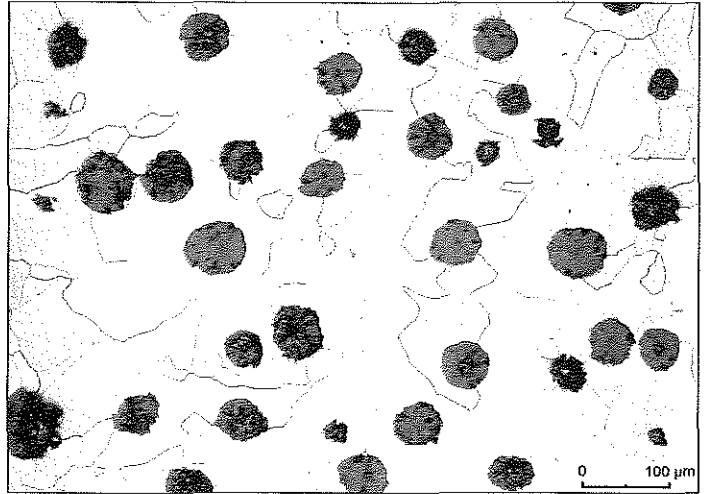
# Gußeisen mit Kugelgraphit

EN-GJS-400-15/5



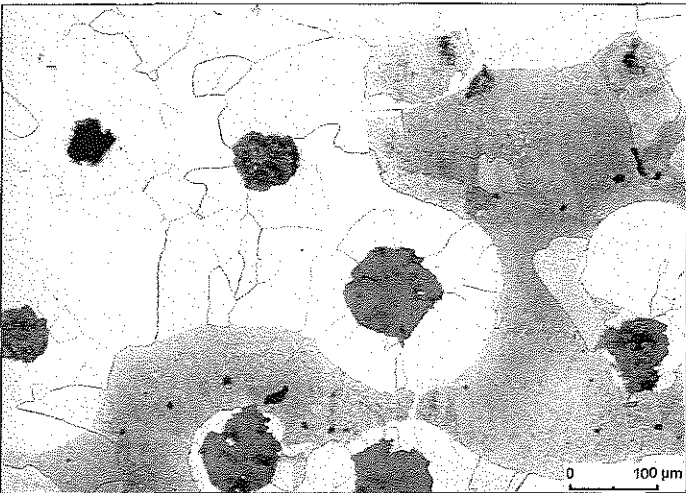
$V_G = 11\%$ ,  $d_G = 17 \mu\text{m}$ ,  $\lambda = 33 \mu\text{m}$ ,  $f = 0,84$

EN-GJS-400-15/8



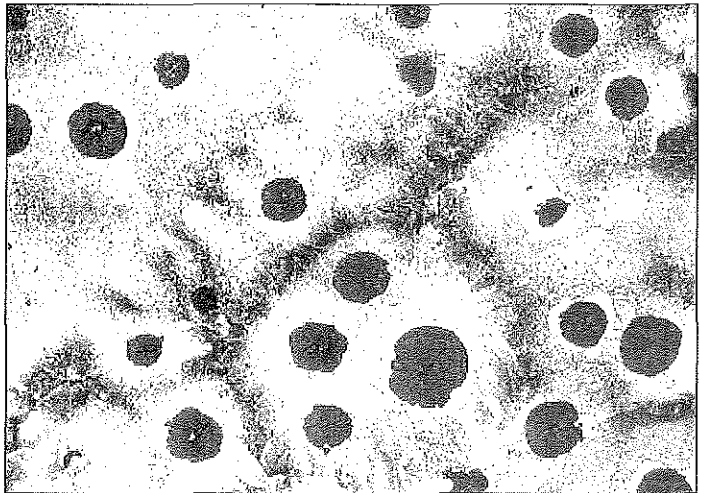
$V_G = 10\%$ ,  $d_G = 55 \mu\text{m}$ ,  $\lambda = 89 \mu\text{m}$ ,  $f = 0,74$

EN-GJS-400-15/9



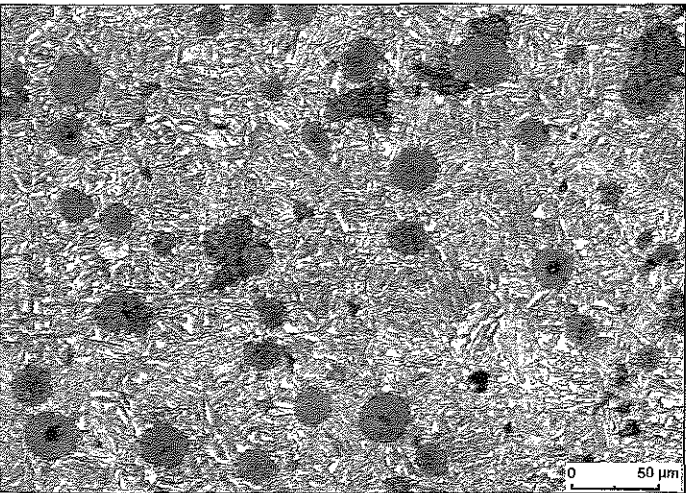
$V_G = 13\%$ ,  $d_G = 51 \mu\text{m}$ ,  $\lambda = 87 \mu\text{m}$ ,  $f = 0,76$

EN-GJS-600-3



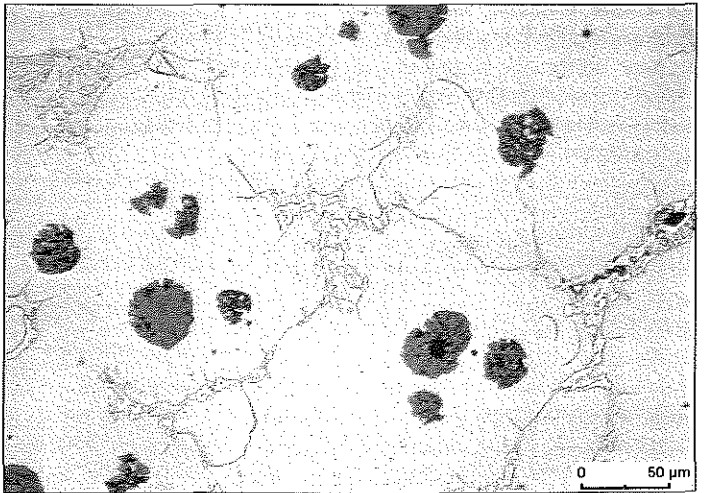
$V_G = 10\%$ ,  $d_G = 35 \mu\text{m}$ ,  $\lambda = 49 \mu\text{m}$ ,  $f = 0,88$

EN-GJS-1000-5



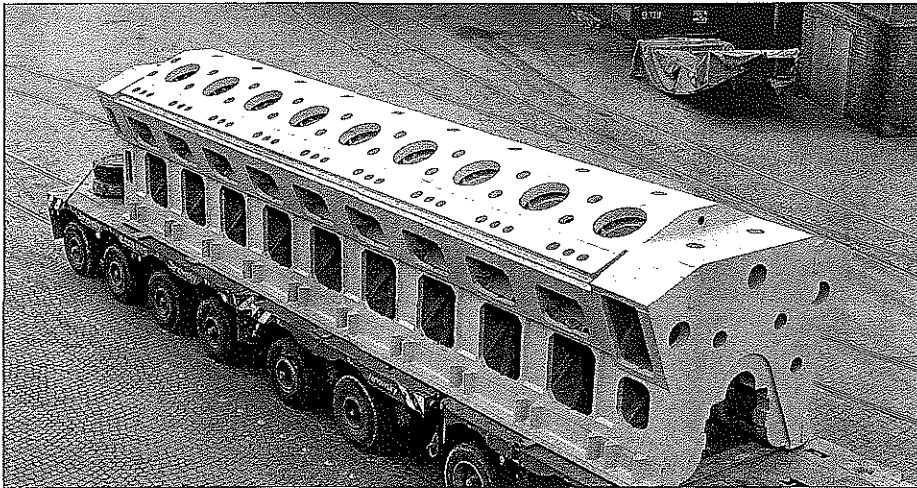
$V_G = 10\%$ ,  $d_G = 35 \mu\text{m}$ ,  $\lambda = 50 \mu\text{m}$ ,  $f = 0,87$

EN-GJSA-XNiSiCr35-5-2



$V_G = 6\%$ ,  $d_G = 19 \mu\text{m}$ ,  $\lambda = 30 \mu\text{m}$ ,  $f = 0,55$

Bild 6: Gefüge und Graphitmorphologieparameter verschiedener Sorten Gußeisen mit Kugelgraphit



**Bild 7: Einteilig gegossenes V-18-Zylinderkurbelgehäuse mit 500 mm Zylinderdurchmesser; Werkstoff: GJS-400-18, Motorleistung: 16,3 MW, Gewicht: 87 t, Abmessungen 11150 × 2600 × 2460 mm (Bild: Thyssen, Mülheim)**

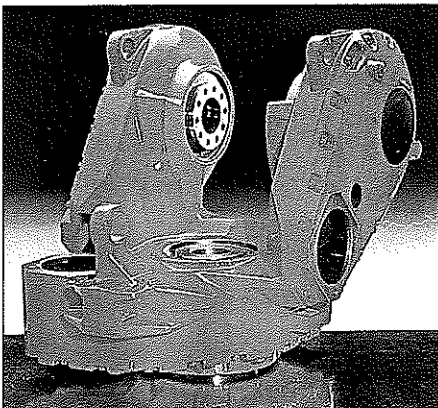
Chemische Zusammensetzung, mechanische Eigenschaften sowie Gefüge dieser Gußeisenwerkstoffe sind aus den Tabellen 5 und 6 sowie aus Bild 6 ersichtlich. Die gemessenen elastischen Konstanten und Angaben aus dem Schrifttum sind in den Tabellen 7 bis 9 zusammengestellt. Die mit unterschied-

lichen Meßmethoden ermittelten dynamischen Elastizitäts- und Schubmoduln stimmen weitestgehend überein und liegen auch hier tendenziell über den statisch bestimmten Werten. Ein systematischer Einfluß des Grundgefüges ist nicht erkennbar. Nach Messungen des statischen Elastizitätsmoduls an ferriti-

schen, ferritisch-perlitischen und perlitischen Gußeisen mit Kugelgraphit liegen die Werte im Bereich von 170 bis 177 kN/mm<sup>2</sup> [16]. Vergleichende statische und dynamische Messungen ergeben nach [15] für EN-GJS-400-15 Werte von 165 kN/mm<sup>2</sup> beziehungsweise 173 kN/mm<sup>2</sup> und 171 kN/mm<sup>2</sup> beziehungsweise 176 kN/mm<sup>2</sup> für EN-GJS-600-3.

Die statischen und dynamischen Elastizitätsmoduln für EN-GJS-1000-5 (ADI) liegen im Bereich der in Tabelle 13 aufgeführten Anhaltswerte und stimmen mit den in [36] über die Resonanzmethode ermittelten dynamischen Elastizitätsmoduln überein, die im Festigkeitsbereich von 1050 bis 1710 N/mm<sup>2</sup> zu 170 bis 163 kN/mm<sup>2</sup> angegeben werden.

Die Bestimmung der elastischen Konstanten über die Messung der Ultraschallwellengeschwindigkeit beziehungsweise der Resonanzfrequenz an ADI mit unterschiedlichem Kohlenstoffäquivalent (CE = 4,1 bis 3,3) und Graphitanteil (V<sub>G</sub> = 9,0 bis 6,5%) im Festigkeitsbereich von 988 bis 1095 N/mm<sup>2</sup> ergab E = 171 bis 180 kN/mm<sup>2</sup>, G = 68 bis 71 kN/mm<sup>2</sup> und ν = 0,28 bis 0,29 [37]. Gezielt eingestellte Grund-



**Bild 8: Fertig montiertes Robotergetriebe mit einem Gehäuse aus EN-GJS-500-7. (Bild: Brook Hansen, Hameln)**

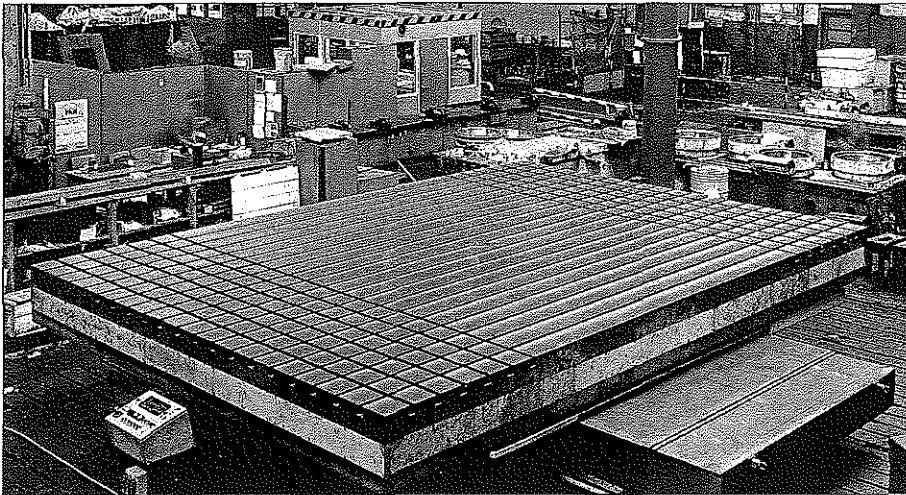
**Tabelle 5: Chemische Zusammensetzung der untersuchten Gußeisenwerkstoffe mit Kugelgraphit und unterschiedlichem Grundgefüge**

Werkstoff-Kurzzeichen	Element [Masse-%]							
	C	Si	Mn	P	S	Mg	Ni	Cr
EN-GJS-400-15/5*)	3,52	2,17	0,24	0,012	0,002	0,024	0,009	-
EN-GJS-400-15/8*)	3,68	2,44	0,15	0,011	0,002	0,041	0,040	-
EN-GJS-400-15/9*)	3,63	2,19	0,16	0,013	0,002	0,047	0,032	-
EN-GJS-400-15/7*)	3,50	2,63	0,10	0,075	0,008	0,053	0,048	-
EN-GJS-600-3	3,80	2,55	0,62	-	0,002	0,026	0,023	-
EN-GJS-1000-5	3,62	2,63	0,66	0,023	0,008	0,042	-	-
EN-GJSA-XNiSiCr35-5-2	2,12	4,74	0,82	-	-	-	35,18	1,96

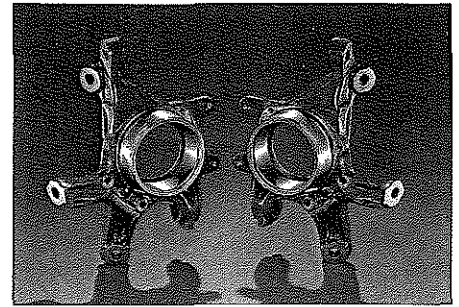
\*) Interne Bezeichnung

Tabelle 6: Behandlung, Gefüge und mechanische Eigenschaften der untersuchten Gußeisen mit Kugelgraphit [23, 24, 26]	Werkstoff-Kurzzeichen	Behandlung	Gefüge	R <sub>p0,2</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	R <sub>m</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	A <sub>5</sub> [%]	Z [%]	HBS
	EN-GJS-400-15/5*)	Kokille	920°C, 2 h/Ofen	ferritisch	282	428	25	27
EN-GJS-400-15/8*)	Hohlbohrproben,		ferritisch	254	385	12	17	146
EN-GJS-400-15/9*)	450 mm Wanddicke		ferritisch-perlitisch	250	396	13	12	150
EN-GJS-400-15/7*)	Sandguß, Y 2,	920°C, 2 h/Ofen	ferritisch	314	440	17	8	148
EN-GJS-600-3	Sandguß, Y 2,	920°C, 2 h/Luft	ferritisch-perlitisch	400	677	5	9	238
EN-GJS-1000-5	Salzbad 870°C, 60 min/ Salzbad 365°C, 120 min/ Wasser		nadeliger Ferrit und 30 bis 40% Austenit	800	1062	8	9	344
EN-GJSA-XNiSiCr35-5-2	Sandguß, Y 2		austenitisch	210	411	19	-	158

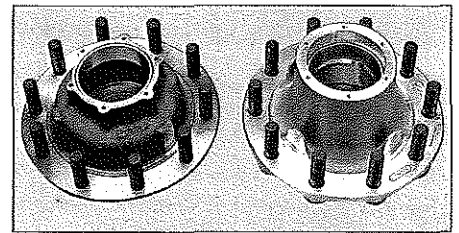
\*) Interne Bezeichnung



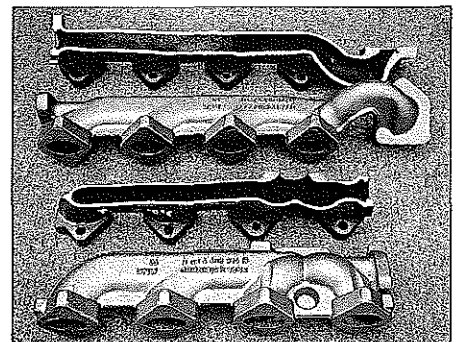
**Bild 9:** Extreme Steifigkeitsanforderungen waren der Grund, warum für diesen Aufspanntisch vom konventionellen Gußeisen mit Lamellengraphit auf Gußeisen mit Kugelgraphit EN-GJS-600-3 übergegangen wurde; Abmessungen: 5000 mm × 6000 mm, Gewicht: 72,7 t (Bild: Siempelkamp, Krefeld)



**Bild 10:** Radträger für die Hinterachse eines Pkw der oberen Leistungsklasse; Werkstoff: EN-GJS-400-18-LT (Bild: Georg Fischer, Singen)



**Bild 11:** Substitution einer Alu-Radnabe (rechts, 15,3 kg) durch ADI (links, 14,8 kg); neben geringerem Gewicht werden mit ADI die Kosten um 15 % gesenkt (Bild: ADI Treatments, GB-West Bromwich)



**Bild 12:** Abgassammelrohre aus EN-GJSA-XNiSiCr35-5-2 für beide Zylinderreihen des BMW-V8-Dieselmotors; Wanddicke: nur 3 mm (Bild: Monforts, Mönchengladbach)

gefüge Ausferrit, Perlit-Ferrit, angelassener Martensit und Martensit lassen einen Abfall des Elastizitätsmoduls von maximal 171 kN/mm<sup>2</sup> (Perlit-Ferrit) auf 157 kN/mm<sup>2</sup> (Martensit) erkennen.

Literaturangaben zu den mechanischen Eigenschaften austenitischer Gußeisen mit Lamellen- oder Kugelgraphit weisen für den EN-GJSA-XNiSiCr35-5-2 (GGG-NiSiCr 35 5 2) unter Hinweis auf den nichtlinearen  $\sigma$ - $\epsilon$ -Verlauf unterhalb der  $R_{p0,2}$ -Grenze einen Elastizitätsmodul von 110 bis 145 kN/mm<sup>2</sup> aus [38, 39]. Während mit dem verwendeten Prüfsystem keine Bestimmung des Elastizitätsmoduls über die Messung der Schallgeschwindigkeit aufgrund der hohen Schallschwächung möglich war, ist die Bestimmung über die Resonanzfrequenz unproblematisch.

**Tabelle 7:** Elastische Konstanten der untersuchten Sorten Gußeisen mit Kugelgraphit

Werkstoff-Kurzzeichen	Meßmethode						
	statisch	dynamisch				Resonanzverfahren	
		Ultraschallverfahren			$\nu$	E	G
E	E	G	E	G			
	[kN/mm <sup>2</sup> ]	[kN/mm <sup>2</sup> ]	[kN/mm <sup>2</sup> ]		[kN/mm <sup>2</sup> ]	[kN/mm <sup>2</sup> ]	
EN-GJS-400-15/5 *)	182	175	68	0,29			
EN-GJS-400-15/8 *)	164	173	67	0,29	174	68	0,27
EN-GJS-400-15/9 *)	174	172	67	0,29	172	68	0,25
EN-GJS-400-15/7 *)	157	169	66	0,28			
EN-GJS-600-3	168	173	67	0,28	174	69	0,26
EN-GJS-1000-5	166	162	64	0,28	168	66	0,28
EN-GJSA-XNiSiCr35-5-2	146	n. b. <sup>1)</sup>	n. b. <sup>1)</sup>	n. b. <sup>1)</sup>	135	57	0,17

\*) Interne Bezeichnung    <sup>1)</sup> Nicht bestimmbar

**Tabelle 8:** Elastische Konstanten von Gußeisen mit Kugelgraphit (Anhaltswerte) [35]

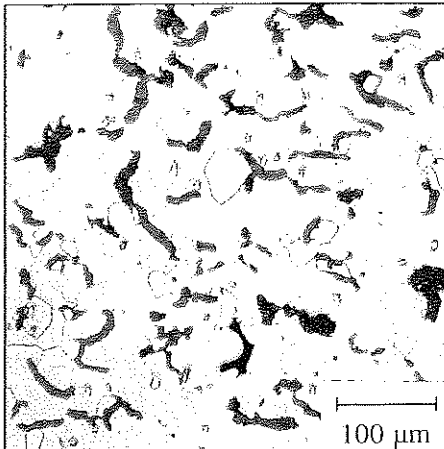
Kennwert	Werkstoff-Kurzzeichen EN-GJS-...							
	350-22	400-18	450-10	500-7	600-3	700-2	800-2	900-2
E [kN/mm <sup>2</sup> ]	169	169	169	169	174	176	176	176
$\nu$	0,275							

**Tabelle 9:** Elastische Konstanten von bainitischem Gußeisen mit Kugelgraphit (ADI, Anhaltswerte) [35]

Kennwert	Sorte nach ASTM A 897M-90				
	850-550-10 (Grade 1)	1050-700-07 (Grade 2)	1200-850-04 (Grade 3)	1400-1100-01 (Grade 4)	1600-1300-00 (Grade 5)
E [kN/mm <sup>2</sup> ]	163	160	158	156	155
$\nu$	0,25				

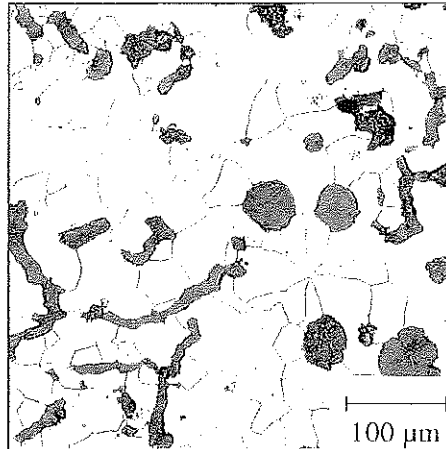
# Gußeisen mit Vermiculargraphit

EN-GJV-300/4



$V_G = 11\%$ ,  $d_G = 12 \mu\text{m}$ ,  $\lambda = 37 \mu\text{m}$ ,  $f = 0,32$

EN-GJV-300/6



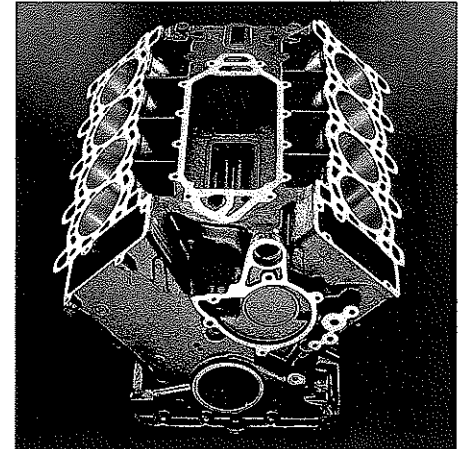
$V_G = 12\%$ ,  $d_G = 17 \mu\text{m}$ ,  $\lambda = 51 \mu\text{m}$ ,  $f = 0,44$

**Bild 13:** Gefüge und Graphitmorphologieparameter von zwei Gußeisen mit Vermiculargraphit

Die Schmelzen wurden zu Y2-Probe-körpern vergossen (Sandguß) und ferritisierend gegläht (920°C/3 h/Ofen). Chemische Analyse und mechanische Eigenschaften nennen die *Tabellen 10 und 11*. Das Gefüge (*Bild 13*) zeichnet sich durch eine unterschiedliche Graphitmorphologie aus. Die elastischen Konstanten sind in den *Tabellen 12 und 13* zusammengestellt.

Die Spannungs-Dehnungs-Kurven zeigen im Gegensatz zu Gußeisen mit Lamellengraphit eine deutliche Proportionalitätsgrenze. Dabei wurde nach mehrmaligen Be- und Entlastungen ein Anstieg des statischen Elastizitätsmoduls beobachtet sowie statische und dynamische Elastizitätsmoduln in Abhängigkeit vom Vermiculargraphitanteil (60 und 85%) im Temperaturbereich von -120°C bis 750°C bestimmt [34]. Der dynamische Elastizitätsmodul nimmt von 20°C bis 600°C linear auf etwa 81% ab und beträgt bei 750°C noch etwa 60% der Werte bei 20°C.

Die in [12] mitgeteilten Ergebnisse bestätigen den linearen Verlauf der Spannungs-Dehnungs-Kurve im Zugversuch bis zur Proportionalitätsgrenze, wobei der Elastizitätsmodul für ferritisches GJV mit 137 bis 140 kN/mm<sup>2</sup> und für perlitisches GJV mit 144 bis 145 kN/mm<sup>2</sup> angegeben wird. Der Elastizitätsmodul wird mit zunehmendem Anteil Kugelgraphit größer [12]. In Analogie zu den Messungen an Gußeisen mit Lamellengraphit zeigen Messungen an EN-GJV-300 im Temperaturbereich von 20°C bis 600°C, daß die dynamischen Elastizitätsmoduln größer als die statischen Werte sind [15].



**Bild 14:** Zylinderkurbelgehäuse aus Gußeisen mit Vermiculargraphit für einen 8-Zyl.-3,9-l-Dieselmotor (Bild: BMW, München)

**Tabelle 10: Chemische Zusammensetzung der untersuchten Gußeisen mit Vermiculargraphit**

Werkstoff-Kurzzeichen	Element [Masse-%]								
	C	Si	Mn	P	S	Mg	Ni	Ce	Al
EN-GJV-300/4*)	3,49	2,57	0,10	0,066	0,017	0,004	0,034	0,039	0,089
EN-GJV-300/6*)	3,16	2,31	0,094	0,069	0,017	0,02	0,56	0,005	0,01

\*) Interne Bezeichnung

Werkstoff-Kurzzeichen	$R_{p0,2}$	$R_m$	$A_{10}$	Z	HBS
	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[%]	[%]	
EN-GJV-300/4*)	240	295	5	3	137
EN-GJV-300/6*)	225	325	8	4	132

\*) Interne Bezeichnung

**Tabelle 12: Elastische Konstanten von Gußeisen mit Vermiculargraphit [22, 30]**

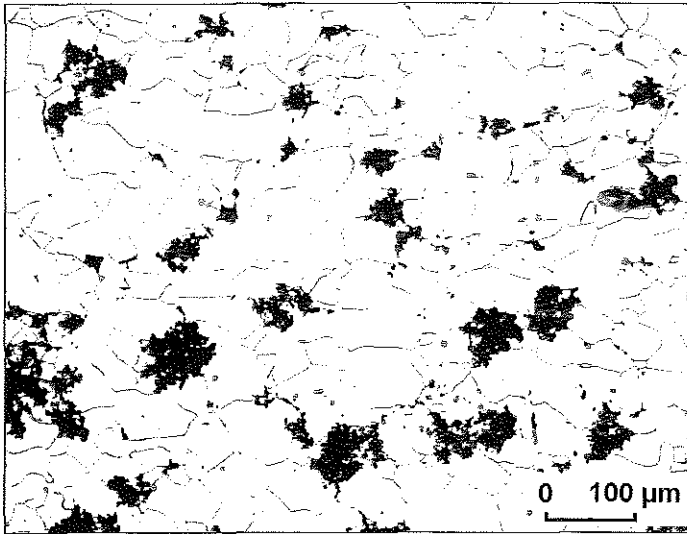
Werkstoff-Kurzzeichen	Meßmethode						
	statisch	dynamisch					
		Ultraschallverfahren			Resonanzverfahren		
	E	E	G	$\nu$	E	G	$\nu$
	[kN/mm <sup>2</sup> ]	[kN/mm <sup>2</sup> ]	[kN/mm <sup>2</sup> ]		[kN/mm <sup>2</sup> ]	[kN/mm <sup>2</sup> ]	
EN-GJV-300/4*)	126	149	58	0,28	144	56	0,28
EN-GJV-300/6*)	136	153	60	0,28	154	60	0,28

\*) Interne Bezeichnung

Kennwert	Werkstoff-Kurzzeichen EN-GJV-...		
	300	400	500
	E [kN/mm <sup>2</sup> ]	140 bis 160	160 bis 170
$\nu$	0,25		

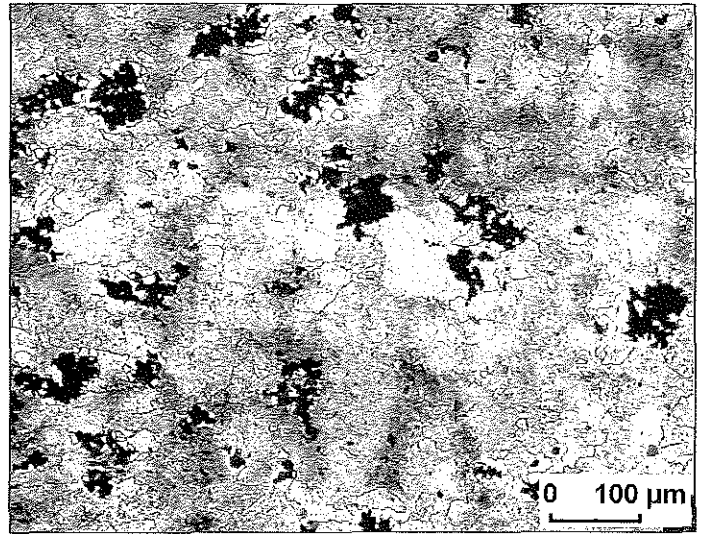
# Weißer und schwarzer Temperguß

EN-GJMB-350-10



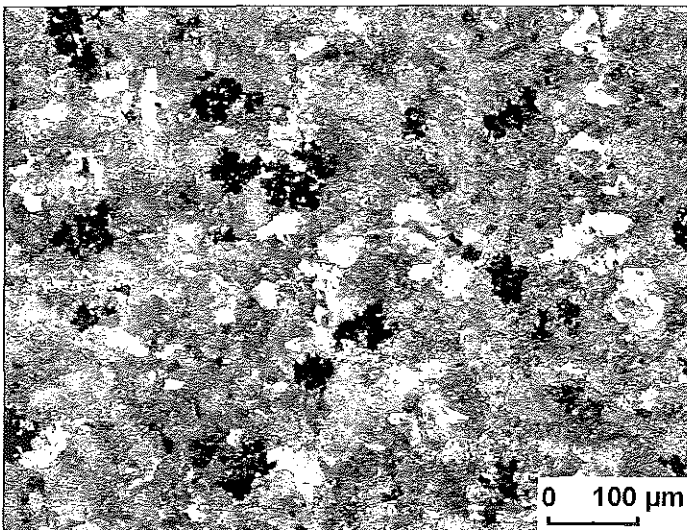
$V_G = 10\%$ ,  $d_G = 9\ \mu\text{m}$ ,  $\lambda = 21\ \mu\text{m}$ ,  $f = 0,54$

EN-GJMB-450-6



$V_G = 9\%$ ,  $d_G = 9\ \mu\text{m}$ ,  $\lambda = 21\ \mu\text{m}$ ,  $f = 0,55$

EN-GJMB-650-2



$V_G = 8\%$ ,  $d_G = 11\ \mu\text{m}$ ,  $\lambda = 24\ \mu\text{m}$ ,  $f = 0,64$

◀ Bild 15: Gefüge ▲ und Graphitmorphologieparameter verschiedener Sorten nichtentkohlend geglühten Tempergusses

Bild 16: Schwerlast-Spreizdübel aus EN-GJMB-350-10, Stückgewichte: 3 bis 150 g (Bild: VS, Solingen) ▶

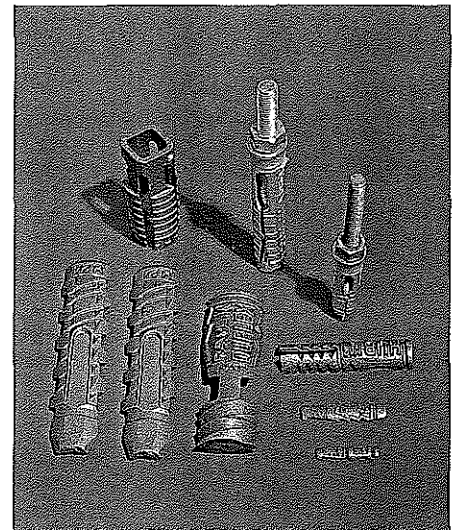


Tabelle 14: Chemische Zusammensetzung der untersuchten nichtentkohlend geglühten Tempergußsorten (Schwarzer Temperguß)	Werkstoff-Kurzzeichen	Element [Masse-%]										
		C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Cu	Ni	Mg	Al
	EN-GJMB-350-10	2,25	1,32	0,36	0,04	0,071	0,04	0,003	0,04	0,04	< 0,001	0,002
	EN-GJMB-450-6	2,62	1,37	0,40	0,04	0,073	0,04	0,003	0,04	0,04	< 0,001	0,004
	EN-GJMB-650-2	2,56	1,24	0,72	0,04	0,072	0,04	0,004	0,04	0,04	< 0,001	< 0,001

Tabelle 15: Mechanische Eigenschaften der nichtentkohlend geglühten Tempergußsorten (Schwarzer Temperguß)	Werkstoff-Kurzzeichen	$R_{p0,2}$	$R_m$	$A_3$	Z	HBW
		[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[%]	[%]	
	EN-GJMB-350-10	213	332	15	13	125
	EN-GJMB-450-6	312	453	10	10	163
	EN-GJMB-650-2	450	703	6	5	245



Bild 17: Fertig montierte Pkw-Anhängerkupplung mit einem Gehäuse und einem untenliegenden Verriegelungsstück aus EN-GJMW-450-7 (Bild: Nefit, NL-Deventer)

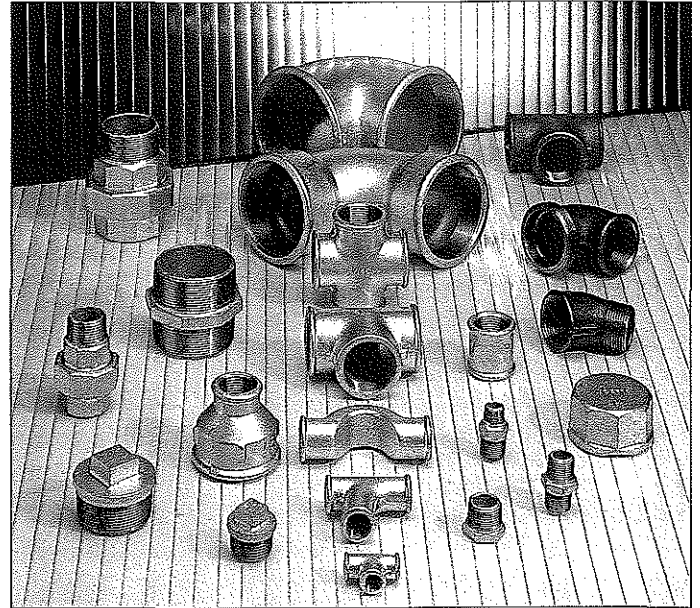


Bild 18: Verzinkte und nicht verzinkte („schwarze“) Fittings aus verschiedenen Sorten weißen Tempergusses (EN-GJM) (Bild: Woeste, Velbert)

Tabelle 16: Elastische Konstanten der untersuchten nichtentkohlend geglähten Tempergußsorten (Schwarzer Temperguß)	Werkstoff-Kurzzeichen	Meßmethode						
		statisch		dynamisch				
	Ultraschallverfahren				Resonanzverfahren			
	E	E	G	$\nu$	E	G	$\nu$	
EN-GJMB-...	[kN/mm <sup>2</sup> ]				[kN/mm <sup>2</sup> ]			
350-10	170	174	68	0,28	173	68	0,26	
450-6	170	174	68	0,28	173	68	0,26	
650-2	177	185	72	0,29	185	72	0,28	

Tabelle 17: Elastische Konstanten von nichtentkohlend geglähtem Temperguß (Schwarzer Temperguß) [41, 42]	Kennwert	Werkstoff-Kurzzeichen EN-GJMB-...				
		350-10	460-6	550-4	650-2	700-2
E [kN/mm <sup>2</sup> ]	175 bis 195					
$\nu$	0,27					

Tabelle 18: Chemische Zusammensetzung der untersuchten entkohlend geglähten Tempergußsorten (Weißer Temperguß)	Werkstoff-Kurzzeichen	Element [Masse-%]					
		C	Si	Mn	P	S	Cr
EN-GJMW-400-5	3,19	0,65	0,56	0,051	0,111	0,058	
EN-GJMW-450-7	3,17	0,69	0,65	0,051	0,092	0,049	
EN-GJMW-550-4	3,13	0,62	0,62	0,048	0,105	0,052	

Tabelle 19: Mechanische Eigenschaften der entkohlend geglähten Tempergußsorten; 12 mm Proben-durchmesser [27]	Werkstoff-Kurzzeichen	$R_{p0,2}$	$R_m$	$A_3$	Z	HBS
		[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[%]	[%]	
EN-GJMW-400-5	294	525	4	4	202	
EN-GJMW-450-7	282	494	9	11	169	
EN-GJMW-550-4	410	584	2	3	215	

Die Messungen erfolgten sowohl an nichtentkohlend geglähtem, schwarzen Temperguß [25, 40] als auch im Rahmen laufender Untersuchungen an entkohlend geglähtem, weißem Temperguß [27]. Chemische Zusammensetzung, mechanische Eigenschaften sowie Gefügeausbildung der nichtentkohlend geglähten Tempergußsorten sind aus den Tabellen 14 und 15 sowie Bild 15 ersichtlich. In Tabelle 16 sind die gemessenen Werte für die elastischen Konstanten zusammengestellt, der Vergleich zu Angaben im Schrifttum ist durch Tabelle 17 gegeben. Die Spannungsabhängigkeit des statischen Elastizitätsmoduls führt bei EN-GJMB-350-10 in der Spannungs-Dehnungs-Kurve zum Abweichen vom linearen Verlauf bei 50% der 0,2%-Dehngrenze. Bei EN-GJMB-450-6 und EN-GJMB-650-2 trat dies bei 70% beziehungsweise 75% der 0,2%-Dehngrenze auf.

Chemische Zusammensetzung und mechanische Eigenschaften des entkohlend geglähten Tempergusses nennen die Tabellen 18 und 19. Die Werte für die gemessenen elastischen Konstanten sind in Tabelle 20 zusammengestellt, der Vergleich mit Angaben im Schrifttum ist nach [41, 43] über die in Tabelle 17 angegebenen Werte möglich. Auffallend ist hier die gute Übereinstimmung der statisch und dynamisch bestimmten elastischen Konstanten. Charakteristisch für entkohlend geglähten Temperguß ist der gefügebedingte Eigenschaftsgradient. Die zur Bestimmung der elastischen Konstanten über die Messung der Resonanzfrequenz verwendeten kleinen Probenabmes-

sungen ermöglichten eine Probenahme aus den Bereichen Rand und Kern der getemperten Probestücke. Für beide Bereiche wurden die in Tabelle 20 dargestellten elastischen Konstanten gemessen.

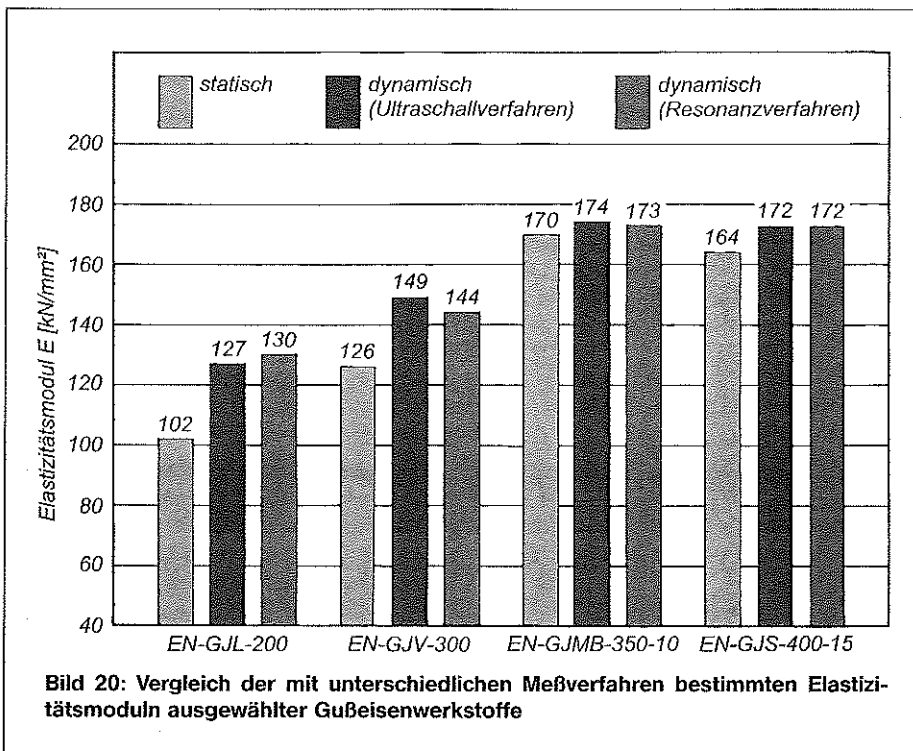
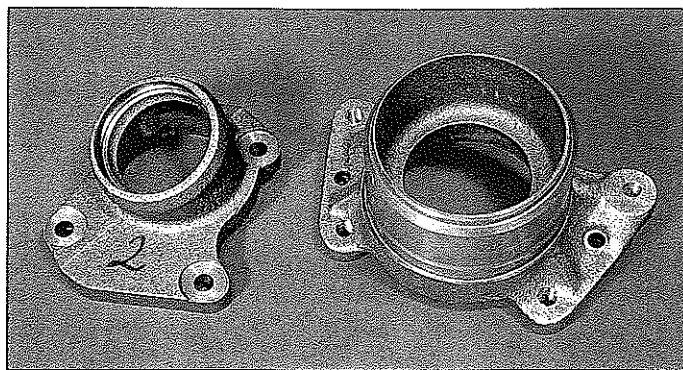
## Zusammenfassung

Vergleichende statische und dynamische Messungen der elastischen Konstanten von Gußeisenwerkstoffen mit unterschiedlichen Grundgefügen und Graphitausbildungen bestätigen sowohl ihre Abhängigkeit von der Graphitform als auch von der zur Anwendung kommenden Meßmethode (Bild 8). Die dynamisch bestimmten Elastizitätsmoduln sind größer als die statisch bestimmten Werte, liegen aber im Bereich der angegebenen Anhaltswerte für Gußeisenwerkstoffe beziehungsweise der im Schrifttum mitgeteilten Meßwerte. Ihr Vorteil besteht in der rationellen Versuchsdurchführung unter Verwendung einfacher kleiner Proben zur Bestimmung sowohl des Elastizitäts- als auch des Schubmoduls beziehungsweise der Poissonschen Konstanten. Beachtenswert ist auch die bei der Resonanzmethode mögliche Messung der elastischen Konstanten bei tiefen und hohen Temperaturen.

## Schrifttum

- [1] DIN 53457: Prüfung von Kunststoffen; Bestimmung des Elastizitätsmoduls im Zug-, Druck- und Biegeversuch. Oktober 1987. EN ISO 527-1: Bestimmung des Elastizitätsmoduls im Zugversuch für Kunststoffe und Kunststoffverbunde. April 1996. EN ISO 527-2: Bestimmung des Elastizitätsmoduls im Zugversuch für Form- und Extrusionsmassen. April 1996
- [2] DIN V ENV 843-2:1996: Hochleistungskeramik. Monolithische Keramik. Mechanische Eigenschaften bei Raumtemperatur. Teil 2: Bestimmung des E-Moduls. Februar 1996
- [3] DIN 1048: Prüfverfahren für Beton, Festbeton, gesondert hergestellte Probekörper. Juni 1991
- [4] DIN 52 186: Prüfung von Holz, Biegeversuch, Juni 1978; DIN 52 192: Druckversuch quer zur Faserrichtung. Mai 1979
- [5] ASTM E 111-97: Standard Test Method for Young's Modulus, Tangent Modulus and Chord Modulus
- [6] DIN EN 10 002:1991: Metallische Werkstoffe, Zugversuch
- [7] Frenz, H., H.-J. Kühn u. T. Fritz: Der Zugversuch. Ergebnisse eines Vergleichsversuchs mit 91 europäischen Prüflabo-

**Bild 19:**  
Achsschenkel aus EN-GJMW-360-12 mit Stückgewichten von 0,9 kg bzw. 1,7 kg für einen Sportwagen (Bild: BET Bremshey, Solingen)



**Tabelle 20: Elastische Konstanten von entkohlend geglühtem Temperguß (Weißer Temperguß)**

Werkstoff-Kurzzeichen	Meßmethode						
	statisch	dynamisch					
		Ultraschallverfahren			Resonanzverfahren		
E	E	G	$\nu$	E	G	$\nu$	
[kN/mm <sup>2</sup> ]	[kN/mm <sup>2</sup> ]	[kN/mm <sup>2</sup> ]		[kN/mm <sup>2</sup> ]	[kN/mm <sup>2</sup> ]		
EN-GJMW-400-5	173	173	68	0,28	173	68	0,28
EN-GJMW-450-7	172	174	69	0,27	175	69	0,27
EN-GJMW-550-4	175	175	69	0,27	176	69	0,27

ratorien. Materialprüfung 40 (1998) 11-12, S. 480 bis 485

- [8] Ledworuski, S., M. Ell u. H.-J. Kühn: Den Elastizitätsmodul sicher bestimmen. Voraussetzungen für die Kraft- und Dehnungsmessung im Zugversuch. Materialprüfung 42 (2000) 4, S. 109 bis 113

[9] Sonne, H.-M.: Bestimmung des Elastizitätsmoduls im Zugversuch. Vortrags- und Diskussionsstagung Werkstoffprüfung 1999, Bad Nauheim, Tagungsband S. 219 bis 230

- [10] Stroppe, H., u. H. Hoffmann: Untersuchungen zum Elastizitätsverhalten von Grauguß. I. Allgemeiner und experimen-

## Symbole und Abkürzungen

$A_3, A_5, A_{10}$	= Bruchdehnung
$c_L, c_T$	= Schallgeschwindigkeit
CE	= Kohlenstoffäquivalent
$d_G$	= Graphitteilchengröße
E	= Elastizitätsmodul
f	= Graphitformfaktor
$f_L, f_T$	= Resonzfrequenz
G	= Schubmodul
HBS, HBW	= Brinellhärte 2,5 / 187,5
$R_m$	= Zugfestigkeit
$R_{p0,1}, R_{p0,2}$	= Dehngrenze
$S_c$	= Sättigungsgrad
t, $\Delta t$	= Zeit
$V_G$	= Volumenanteil Graphit
Z	= Brucheinschnürung
$\epsilon$	= Dehnung
$\nu$	= Poissonszahl
$\lambda$	= Graphitteilchenabstand
$\rho$	= Dichte
$\sigma$	= Spannung

teller Teil. Wiss. Z. d. TH Otto v. Guericke Magdeburg 9 (1965) Heft 5/6, S. 637 bis 663

- [11] Stroppe, H.: Untersuchungen zum Elastizitätsverhalten von Grauguß. II. Theoretischer Teil. Wiss. Z. d. TH Otto v. Guericke Magdeburg 10 (1966) Heft 1/2, S. 159 bis 173
- [12] Nechtelberger, E.: Gußeisenwerkstoffe, Eigenschaften unlegierter und niedriglegierter Gußeisen mit Lamellengraphit/Kugelgraphit/Vermiculargraphit im Temperaturbereich bis 500°C. Teil 1: Textband, Teil 2: Tafelband, Teil 3: Bildband. Fachverlag Schiele u. Schön, Berlin 1977
- [13] Löhe, D.: Verformungsverhalten von ferritischem Gußeisen mit unterschiedlicher Graphitausbildung. Dissertation Universität Karlsruhe, 1980
- [14] Löhe, D., O. Vöhringer u. E. Macherauch: Der Einfluß der Graphitform auf den Elastizitätsmodul von ferritischem Gußeisenwerkstoffen. Z. Metallkunde 74 (1983) 5, S. 265 bis 273
- [15] Löhe, D., O. Vöhringer u. E. Macherauch: Die Verformungsabhängigkeit des Elastizitätsmoduls von Gußeisenwerkstoffen zwischen 20°C und 600°C. Gießerei-Forschung 36 (1984) 2, S. 43 bis 52
- [16] Wolfensberger, S., P. Uggowitzer u. M. O. Speidel: Ein Beitrag zum Einfluß der Graphitmorphologie auf den Elastizitätsmodul von Gußeisen. Gießerei-Forschung 39 (1987) 3, S. 129 bis 132
- [17] Fang, L.-Y., K. E. Metzloff, R. C. Voigt u. C. R. Loper Jr.: Der Elastizitätsmodul von graphitischen Gußeisen. Z. konstruieren + giessen 23 (1998) 4, S. 8 bis 13
- [18] Blumenauer, H. (Hrsg.): Werkstoffprüfung. Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, Stuttgart, 1994
- [19] Rosenberg, R.: Bestimmung des Elastizitäts- und Gleitmoduls mit Ultraschall. Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung (DGZfP). Jahrestagung, Siegen, 9. bis 11. Mai 1988, Berichtsband, S. 413 bis 419
- [20] Bergner, F.: Ultraschall-Impuls-Laufzeit-Messung zur Materialcharakterisierung. Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung (DGZfP), Seminar „Zerstörungsfreie Materialcharakterisierung“, Jena 14. bis 15. Oktober 1996, Berichtsband, S. 109 bis 119
- [21] Lins, W., G. Kaindl, H. Peterlik u. K. Kromp: A novel resonant beam technique to determine the elastic moduli in dependence on orientation and temperature up to 2000°C. Review of Scientific Instruments, Vol. 70, Issue 2, pp. 3052–3058
- [22] Komber, B.: Bruchmechanische Bewertung des Rißausbreitungsverhaltens ferritischer Gußeisenwerkstoffe bei zyklischer Beanspruchung. Dissertation TU Bergakademie Freiberg, 1995
- [23] Rehmer, B.: Bruchmechanische Bewertung ferritischer Gußeisenwerkstoffe mit Kugel- und Vermiculargraphit in Abhängigkeit von Beanspruchungsgeschwindigkeit und -temperatur. Dissertation TU Bergakademie Freiberg, 1992
- [24] Baer, W.: Bruchmechanische Bewertung ferritischer Gußeisenwerkstoffe sowie artgleicher Schweißverbindungen bei statischer Beanspruchung. Dissertation TU Bergakademie Freiberg, 1996
- [25] Brecht, K.: Bewertung des Rißwiderstandsverhaltens von schwarzem Temperguß bei statischer, dynamischer und zyklischer Beanspruchung. Dissertation TU Bergakademie Freiberg, demnächst
- [26] Pusch, G., O. Liesenberg, P. Hübner, T. Brecht u. L. Krodel: Mechanische und bruchmechanische Kennwerte für Gußeisen mit Kugelgraphit. Z. konstruieren + giessen 24 (1999) 2, S. 10 bis 19
- [27] Pusch, G., u. P.-V. Hübner: Bewertung der Bruchsicherheit von weißem Temperguß mit Hilfe bruchmechanischer Methoden. AiF-Vorhaben Nr. 12289 BR/1, laufende Untersuchungen
- [28] DIN EN 1561: 1997: Gußeisen mit Lamellengraphit, Anhang A
- [29] Liesenberg, O., u. D. Wittekopf (Hrsg.): Stahliguß- und Gußeisenlegierungen. Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, Stuttgart, 1992, S. 173
- [30] Pusch, G., B. Bilger u. O. Liesenberg: Beitrag zur bruchmechanischen Bewertung des Rißausbreitungsverhaltens von Gußeisen bei zyklisch-mechanischer Beanspruchung. Gießereitechnik 34 (1988) 3, S. 77 bis 81
- [31] Röhrig, K. (Hrsg.): Taschenbuch der Gießerei-Praxis 2000. Schiele & Schön, Berlin 2000
- [32] VDG-Merkblatt W50 E: 2000: Gußeisen mit Vermiculargraphit
- [33] Giesserei-Kalender 1993, Taschenbuch der Gießerei-Industrie. Gießerei-Verlag, Düsseldorf 1993
- [34] Sternkopf, J.: Statische und dynamische Festigkeitseigenschaften von Gußeisen mit Vermiculargraphit – Teil 2. Gießereitechnik 31 (1985) 10, S. 303 bis 307
- [35] Wolters, D. B., u. K. Herfurth: Europäische Normung: Gußeisen mit Kugelgraphit – von DIN 1693 zu DIN EN 1563 und neu: DIN EN 1564. Z. konstruieren + giessen 22 (1997) 3, S. 27 bis 37
- [36] Kovacs, B. V.: Bestimmung einiger mechanischer und physikalischer Eigenschaften von bainitischem Gußeisen mit Kugelgraphit mit Hilfe der Resonanzfrequenz. Z. konstruieren + giessen 21 (1996) 1, S. 11 bis 17
- [37] Nadkarni, G., u. a.: Low Carbon Equivalent Austempered Ductile Irons. Trans. AFS 103 (1995), S. 93 bis 101; s. a.: Z. konstruieren + giessen 22 (1997) 2, S. 17 bis 19
- [38] Nickel, O.: Austenitisches Gußeisen. Eigenschaften und Anwendung. Z. konstruieren + giessen 9 (1984) 4
- [39] Röhrig, K.: Austenitisches Gußeisen – Eigenschaften und Anwendung. Z. konstruieren + giessen 18 (1993) 3, S. 4 bis 29
- [40] Brecht, K., G. Pusch u. O. Liesenberg: Bruchmechanische Bewertung von nichtentkohlend geglühtem Temperguß. Gießerei 87 (2000) 5, S. 37 bis 42
- [41] Engels, A., u. a.: Duktiles Gußeisen: Temperguß. Z. konstruieren + giessen 8 (1983) 1/2
- [42] Werning, H.: Schwarzer Temperguß – Herstellung, Eigenschaften und erfolgreiche Anwendungen. Z. konstruieren + giessen 25 (2000) 1, S. 27 bis 42
- [43] Werning, H.: Weißer Temperguß – Werkstoffspezifische Eigenschaften. Z. konstruieren + giessen 21 (1996) 2, S. 24 bis 32