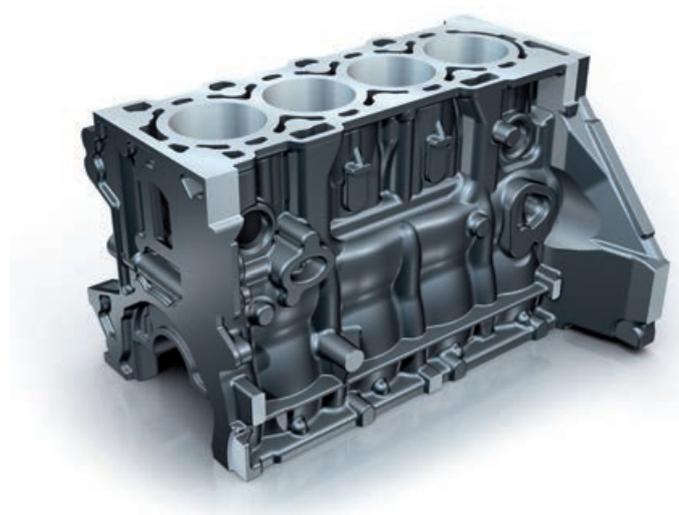


Gusseisen mit Lamellengraphit



Herstellung – Eigenschaften – Anwendung



Der BDG-Casting Adviser – die Zukunft beginnt jetzt



Konstruieren und Gießen

Informationen für den Gusskonstrukteur



Der Bundesverband der Deutschen Gießerei-Industrie bietet einen neuen Internetservice für Konstrukteure an: den Casting Adviser – das Programm zur schnellen Ermittlung von Gusswerkstoffen und Gießverfahren.

Besuchen Sie uns online unter: www.kug.bdguss.de

Inhalt

Gusseisen mit Lamellengraphit

Herstellung – Eigenschaften – Anwendung

Autoren:

Rüdiger Deike, Albrecht Engels, Friedrich Hauptvogel, Peter Henke, Klaus Röhrig, Wilfried Siefer, Horst Werning und Diether Wolters



Titelbild: Zylinderkurbelgehäuse in konsequent umgesetzter Leichtbaukonstruktion sind ein Hauptanwendungsgebiet für GJL-Gussteile

1	Einleitung	2
2	Metallurgie und Herstellung	6
3	Qualitätsmanagement	14
4	Werkstoffsorten und Eigenschaften	19
5	Mechanische Eigenschaften bei zyklischer Beanspruchung	26
6	Dämpfungsfähigkeit	29
7	Eigenschaften bei erhöhten Temperaturen	31
8	Eigenschaften bei niedrigen Temperaturen	36
9	Bruchmechanische Eigenschaften	39
10	Physikalische Eigenschaften	41
11	Verschleißbeständigkeit	45
12	Einsatz von C-Techniken	47
13	Wärmebehandlung	51
14	Randschichthärten	57
15	Anwendungsbeispiele	60
16	Schrifttum	81
17	Bildnachweis	82



GJL hat ein sehr gutes Fließ- und Formfüllungsvermögen und ist damit vielseitig einsetzbar



Gehäuseteile für Pumpen, Verdichter und Motoren sind wegen der guten Gießeigenschaften ein Haupteinsatzgebiet von GJL-Teilen



Lagergehäuse mit integrierten Hydraulik- und Schmierkanälen aus GJL-250

Gussteil Filtergehäuse mit komplexer Innenraumgestaltung aus GJL-250



Gußeisen mit Lamellengraphit – der altbewährte und sich stets verjüngende Werkstoff

„ Es gibt auf der Welt keinen Werkstoff, der vom Maschinenkonstrukteur mehr gebraucht und dabei gleichzeitig weniger verstanden wird als das graue Gußeisen. Die Tatsache, daß es so billig ist, daß es einer der ältesten Maschinenbauwerkstoffe ist, und daß man es so leicht und schnell in die gewünschte Form bringen kann, hat dazu geführt, daß man es als eine ganz gewöhnliche und selbstverständliche Sache hinnimmt. Wenn Gußeisen teuer wäre und recht schwierig in Form zu bringen und schwer zu bearbeiten, so würden sich die Ingenieure zweifellos seines Wertes für den Maschinenbau viel mehr bewußt sein und sich über seine unvergleichlichen Eigenschaften besser informieren.“

(A. H. Dierker, Universität Ohio)

Der traditionelle Werkstoff Gußeisen mit Lamellengraphit (GJL) ist auch heute noch überaus erfolgreich: Seine Jahresproduktion ist größer als die aller anderen Gußwerkstoffe zusammen, was nicht nur national, sondern auch weltweit gilt. Dies hat mehrere Ursachen, von denen die Wirtschaftlichkeit – die Summe von Werkstoff-, Herstell-, Betriebs- und Entsorgungskosten – die größte Bedeutung hat. Denn die Kosten geben immer dann Ausschlag, wenn ohne Einbuße an Gebrauchs- und Leistungsfähigkeit Alternativen bestehen.

Weitere Auswahlkriterien sind beispielsweise die anwendungstechnisch günstigen mechanischen, physika-

lischen oder technologischen Eigenschaften. Hinzu kommen die hervorragenden gießtechnischen Eigenschaften, die Voraussetzung sind, auch Bauteile mit komplizierter Geometrie, ausgezeichneter Oberflächengüte, hoher Konturenschärfe sowie großer Abbildegengenauigkeit zu realisieren. Ferner ist darauf hinzuweisen, daß es sich bei Gußeisen mit Lamellengraphit um einen überaus robusten Werkstoff handelt, das heißt, er ist unempfindlich gegen Schwankungen von Einflußgrößen und gegen Fehler bei Herstellung und Verwendung. Bei sachgerechter Fertigung und entsprechendem Einsatz ist er ein Hochleistungswerkstoff ohne Befindlichkeiten.

Üblicherweise wird Gußeisen mit Lamellengraphit „Grauguß“, „Graues Gußeisen“, im Volksmund auch schlicht und bezeichnend „Guß“ genannt, eben weil man von diesem Werkstoff sicher und seit Jahrhunderten weiß, daß er durch Gießen in (die) Form gebracht wird. Er ist schon immer ein Synonym für Beständigkeit – ehern, eisern, aus einem Guß. Der Name Grauguß geht auf das Bruchgefüge zurück, das durch seinen Graphitgehalt grau erscheint.

Neben den vielfältigen Möglichkeiten des Einstellens der chemischen Grundzusammensetzung der Hauptbegleitelemente Kohlenstoff, Silicium und Mangan können durch den Einsatz von Legierungselementen die Werkstoffeigenschaften in großer Breite variiert werden, abgestimmt auf den jeweiligen Verwendungszweck. Eine Behandlung der Schmelze durch sogenanntes Impfen und das Beeinflussen der Abkühlgeschwindigkeit während und nach dem Gießen bieten dem Gießer weitere Möglichkeiten, auf das Ergebnis – das Gußprodukt – Einfluß zu nehmen und es zu optimieren.

Zunehmende Bedeutung gewinnen die Argumente des Umweltschutzes. Und hier ist Gußeisen mit Lamellengraphit nahezu unschlagbar: Umweltverträglich in Herstellung und Anwendung ist die vollständige und rückstandslose Wiederverwendbarkeit gegeben. Guß kann sogar als „Erfinder“ oder Vorreiter der modernen Recyclingwirtschaft gelten, wurde doch schon seit vielen Jahrzehnten sein Altmetall als Wertstoff erkannt und dem Kreislauf wieder zurückgeführt. Obwohl Guß auf diese Weise recyclet wird, ist damit Guß aber kein Recyclingprodukt, sondern entsteht nach Gebrauch immer wieder neu und in neuer Leistungsfähigkeit.



Bild 1: Die typischen Mikrogefüge von Gußeisen mit Lamellengraphit (GJL), links = ferritisches, rechts = perlitisches Grundgefüge jeweils mit eingelagerten Graphitlamellen; V = 200 : 1

Einfluß von Graphit und Kohlenstoff

Gußeisen mit Lamellengraphit ist ebenso wie Gußeisen mit Kugel- oder Vermiculargraphit sowie Temper- und Stahlguß ein Eisen-Kohlenstoff-Guß-

werkstoff. Die Besonderheit ist, daß der als Graphit im stahlähnlichen Grundgefüge vorliegende Kohlenstoff vorwiegend lamellare Form hat. Dies bestimmt auch weitgehend die typischen Werkstoffeigenschaften.

Das Grundgefüge von Gußeisen mit Lamellengraphit – wie aller Gußeisenwerkstoffe – ist dem von Stahl vergleichbar: Ferrit, Ferrit/Perlit oder Perlit bis hin zu allen Vergütungsgefügen. Darin eingelagert ist der Lamellengraphit. Vorschein und völlig falsch wäre jetzt die vermeintlich logische Folgerung, ohne Graphit oder Kohlenstoff ginge es noch besser, man begäbe sich nämlich deren günstiger Einflüsse, wie Verbessern

- des Gießens (Formfüllungsvermögen und Erstarrungsverhalten),
- der Gefügedichtheit,
- der Bearbeitbarkeit,
- des Notlaufverhaltens,
- des Schwingungsdämpfungsvermögens,
- der Härbarkeit
- sowie Verringern des Spannungszustandes,

um nur die wichtigsten Stichworte zu nennen.



Bild 3: Komplizierte geometrische Form, geringe Wanddicke, hohe Maßgenauigkeit und korrosionsbeständig gegenüber aufbereiteten und nicht aufbereiteten Wässern sowie den heißen Feuerungsgasen sind Attribute dieses Heizkesselgliedes, realisiert mit Gußeisen mit Lamellengraphit

Der Kohlenstoffgehalt von 3 bis 4 Masseprozent liegt im Gefüge zu wesentlichen Teilen als elementar ausgeschiedener Graphit vor. Wegen der unterschiedlichen Dichte von Eisen und Graphit entsprechen 3,5 Masseprozent Kohlenstoff bis zu 11 Volumenprozent Graphit. Dies kann im Vergleich zu Stählen einerseits in Form einer Gewichtseinsparung umgewertet werden, andererseits kann im Anforderungsfalle der Unterschied in den mechanischen Eigenschaften durch eine entsprechende Werkstoffzugabe gewichtsneutral eliminiert werden.

Die Wirtschaftlichkeit

Die Wirtschaftlichkeit – oder besser: das optimale Preis/Leistungsverhältnis – ist neben den günstigen Werkstoffeigenschaften bei der Weiterverarbeitung und beim Einsatz eine der Triebkräfte für den Markterfolg von Gußeisen mit Lamellengraphit. Zwar wurde und wird von anderen Werkstoffen und Fertigungstechniken versucht, es anzugreifen, aber immer wieder gelang es, verlorenes Terrain zurückzugewinnen und neue Anwendungsgebiete zu erschließen. GJL hat sich inzwischen zu einem High-Tech-Werkstoff für innovative Anwendungen entwickelt, wie zahlreiche Beispiele in dieser Broschüre zeigen.

Die Freiheit der Formgebung durch Gießen trägt erheblich zu dessen Wirtschaftlichkeit bei, was unterstützt wird von der überragenden Gießbarkeit – dem Formfüllungsvermögen



Bild 2: Bei Gußeisen mit Lamellengraphit reicht die Fertigungsbreite von grammleichten bis hin zu mehr als 100 Tonnen schweren Werkstücken, einzig begrenzt von den Fertigungsmitteln; abgebildet ist das 95 Gramm leichte Bauteil aus GJL-100 für ein Präzisionsgerät

– von Gußeisen mit Lamellengraphit. Dies erlaubt einerseits das Herstellen von Bauteilen mit sehr komplizierter Geometrie, andererseits werden in Verbindung mit entsprechend exakten Fertigungseinrichtungen die Maßtoleranzen eingeeengt und damit die Forderungen des Leichtbaus erfüllt; außerdem wird dadurch der Aufwand für das spanende Bearbeiten geringer, die Bearbeitungszugaben werden gleichmäßiger.

Ein wirtschaftlich optimiertes Bauteil wird immer dann erreicht werden, wenn möglichst frühzeitig – schon in der Entwurfsphase – Konstrukteur und Gießer zusammenarbeiten. Dies ist je nach Größe und Schwierigkeitsgrad sowohl bei Serien als auch bei Einzelstücken vorteilhaft. Auf diese Weise können die anwendungstechnischen Forderungen bestens mit den fertigungstechnischen Möglichkeiten abgestimmt und gegenseitig können Anregungen ausgetauscht werden.

Was ist hochwertiges Gußeisen?

Häufig wird von hochwertigem Gußeisen gesprochen, wenn Sorten mit höherer Festigkeit gemeint sind. Das ist in vielen Fällen aber irreführend, da Sorten niedriger Festigkeit zum Beispiel bei thermischer Beanspruchung, Dämpfung oder Notlaufeigenschaften denen höherer Festigkeit überlegen, also hochwertiger sind.

Metallurgie und Herstellung

Den Fertigungsablauf für Bauteile aus Gußeisen mit Lamellengraphit (GJL, „Grauguß“) zeigt *Bild 6*, wobei zu den verschiedenen Arbeitsschritten Hinweise auf mögliche Prüfungen gegeben werden. Als Schmelzaggregat werden vorwiegend der Kupolofen und der Elektrofen eingesetzt.

Durch eine Behandlung der Schmelze durch Impfen kann ihr sogenannter Keimhaushalt gezielt verändert und damit das Erstarrungsverhalten sowie die Werkstoffeigenschaften günstig beeinflusst werden. Übliche Impfmittel sind feinkörniges FeSi oder CaSi, die Zugabemenge beträgt einige Zehntel Prozent. Impfen erhöht die Zahl der Fremdkeime und begünstigt damit das Ausscheiden des Graphits beim Erstarren der Schmelze. Ferner wird das Gefüge feinkörniger, was die Festigkeit verbessert und die Gefahr des Auftretens harter Carbide – „Weißeinstrahlung, Kantenhärte“ – verringert.

Das Eisen-Kohlenstoff-Diagramm

Bei Eisen-Kohlenstoff(Fe-C)-Legierungen stellen sich in Abhängigkeit vom Kohlenstoffgehalt und von der Temperatur bestimmte Gefügestände ein, wie das Diagramm in *Bild 7* verdeutlicht; wiedergegeben ist nur der technisch interessante Bereich bis etwa 6,7 % Kohlenstoff. Dieses Zustandsschaubild gilt nur für den Gleichgewichtszustand des Zweistoffsystems Eisen-Kohlenstoff, es kann durch eine entsprechende Abkühlgeschwindigkeit und/oder durch Anwesenheit von Begleit- oder Legierungselementen erheblich beeinflusst werden. Wie aus dem Bild ersichtlich, wird mit steigendem Kohlenstoffgehalt der Schmelzpunkt entsprechend der Linie ABC deutlich herabgesetzt: Die Viskosität der Schmelze sinkt, Fließ- und Formfüllvermögen verbessern sich erheblich, gießtechnische Probleme nehmen deutlich ab, die Komplexität der Werkstücke kann zunehmen. Das Lösungsvermögen für Kohlenstoff im Austenit wird mit steigender Temperatur entsprechend der Linie SE im Bereich zwi-



Bild 4: Gleichzeitiger Abguß eines Großwerkstücks aus fünf Pfannen

schen eutektoider (PSK) und eutektischer Temperatur (ECF) merklich gesteigert, was für viele Wärmebehandlungen von großer Bedeutung ist.

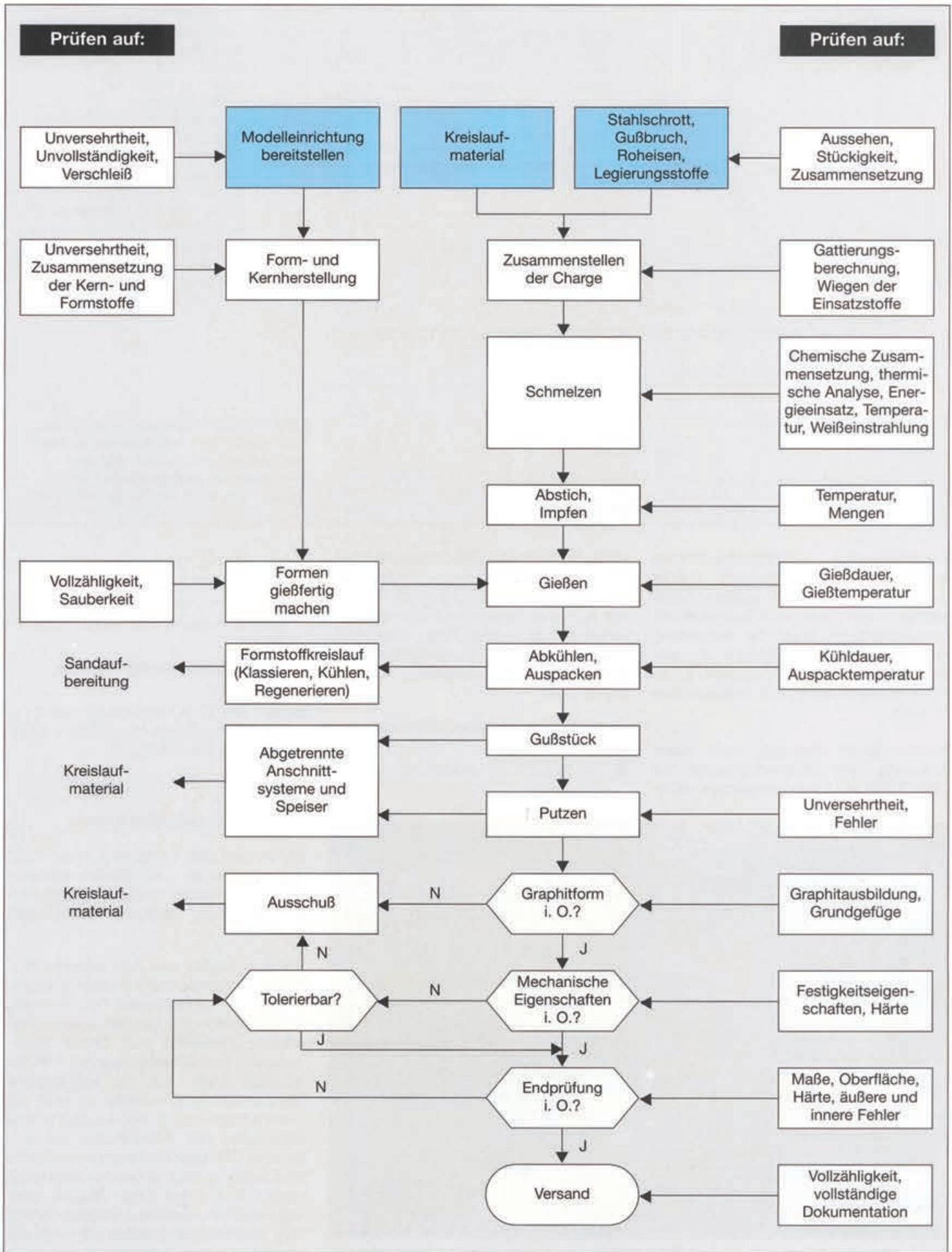
Bild 7 besteht eigentlich aus zwei Zustandsschaubildern, nämlich dem

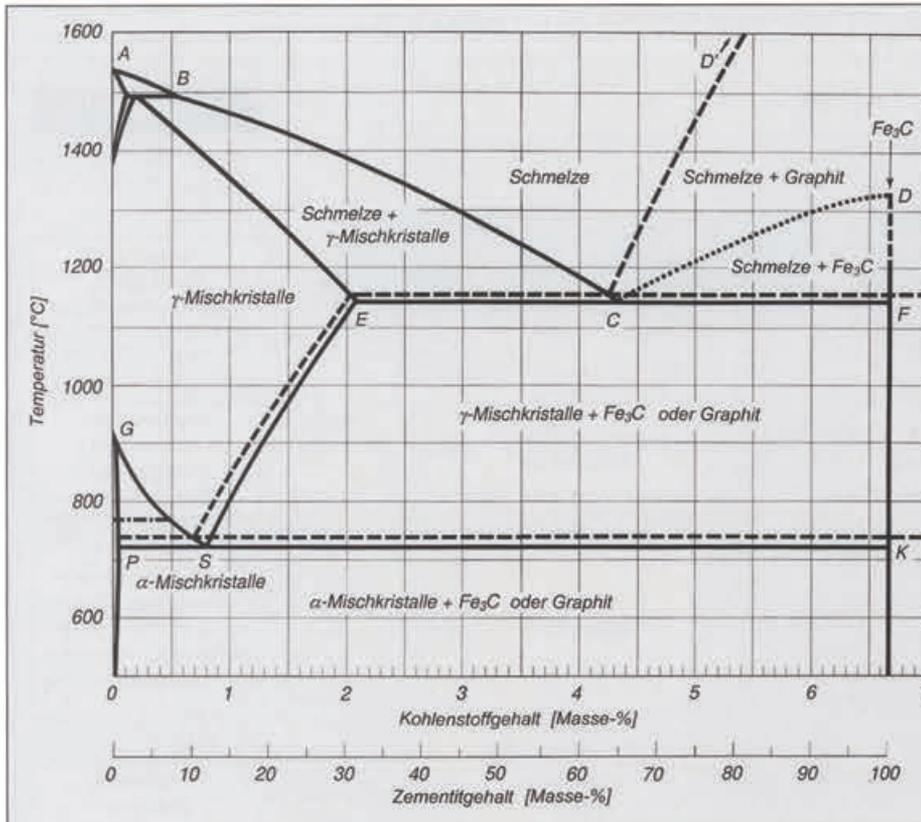
sogenannten stabilen und dem metastabilen System. Die gestrichelten Linien kennzeichnen das stabile System Eisen/Graphit, die durchgezogenen Linien das metastabile System Eisen/Eisencarbid (Fe_3C); letzteres kann durch eine entsprechende Wär-



Bild 5: Steuer- und Leitstand einer Elektroschmelzanlage, im Hintergrund der Abstich eines Ofens

Bild 6: Fertigungsprozess und mögliche Prüfungen für Bauteile aus Gußeisen mit Lamellengraphit





ABCD = Liquiduslinie (Beginnende Kristallisation)
 ECF = Soliduslinie (Eutektische Temperatur, Ende Übergang flüssig – fest)
 BC = Auskristallisation von γ -Mischkristallen
 CD' = Auskristallisation von Graphit
 DC = Auskristallisation von Fe_3C
 PSK = Eutektoide Temperatur
 C = Eutektische Zusammensetzung, rd. 4,3% C
 S = Eutektoide Zusammensetzung, rd. 0,75% C
 α -Mischkristalle = Ferrit
 γ -Mischkristalle = Austenit
 Fe_3C = Eisencarbid, Zementit

Bild 7: Das Zustandsschaubild Eisen-Kohlenstoff mit dem thermisch stabilen (gestrichelte Linien) und dem metastabilen (ausgezogene Linien) System [1], vereinfachte Darstellung

mebehandlung (graphitisierendes Glühen) in das thermisch stabile System Eisen/Graphit umgewandelt werden. – Bei „üblichem“ Gußeisen mit Lamellengraphit läuft die Erstarrung nach dem stabilen System ab, die Umwandlung im festen Zustand (Linie PSK) dagegen nach dem metastabilen System.

Reines Eisen wandelt sich beim Abkühlen vom Erstarrungspunkt bei 1536 °C bis auf Raumtemperatur nach-

einander in drei Modifikationen mit teilweise unterschiedlichem Kristallgitter um. Die Umwandlungspunkte werden mit A_4 bis A_1 bezeichnet und mit dem Index „c“ (c = chauffe) beim Aufheizen und „r“ (r = refroidissement) beim Abkühlen versehen. Daraus ergibt sich:

- 1536 °C = Erstarrungstemperatur \rightarrow δ -Eisen,
- A_4 : 1392 °C, Umwandlung von δ - in γ -Eisen,

- A_3 : 911 °C, Umwandlung von γ - in α -Eisen (unmagnetisch),
- A_2 : 769 °C, Umwandlung von α - (unmagnetisch) in α -Eisen (magnetisch);
bei kohlenstoffhaltigem Eisen außerdem
- A_1 : 723 °C, eutektoide Umwandlung von γ -Eisen in α -Eisen + Fe_3C (Bildung von Perlit).

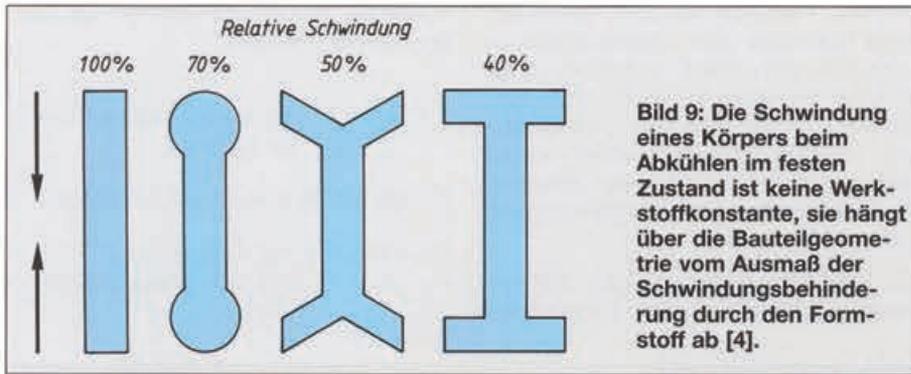
Gefügeausbildungen

Im Verlauf des Erstarrens einer Gußeisenschmelze und deren weiterer Abkühlung treten einige eigenschaftsbestimmende Gefügeveränderungen auf.

Beim Abkühlen aus dem schmelzflüssigen Zustand scheiden sich entsprechend der Liquiduslinie BC Austenit, entsprechend CD Graphit oder Eisencarbid (Zementit) aus. Diese sogenannte Primärkristallisation findet solange statt, bis die eutektische Temperatur ECF erreicht ist und die Zusammensetzung der Restschmelze derjenigen des Eutektikums (C) entspricht. Die anschließende eutektische Erstarrung erfolgt entweder thermisch stabil in Austenit und Graphit oder metastabil in Austenit und Eisencarbid; das metastabile Eutektikum wird als Ledeburit bezeichnet.



Bild 8: Abgießen an einer hochmechanisierten und teilautomatisierten Formanlage



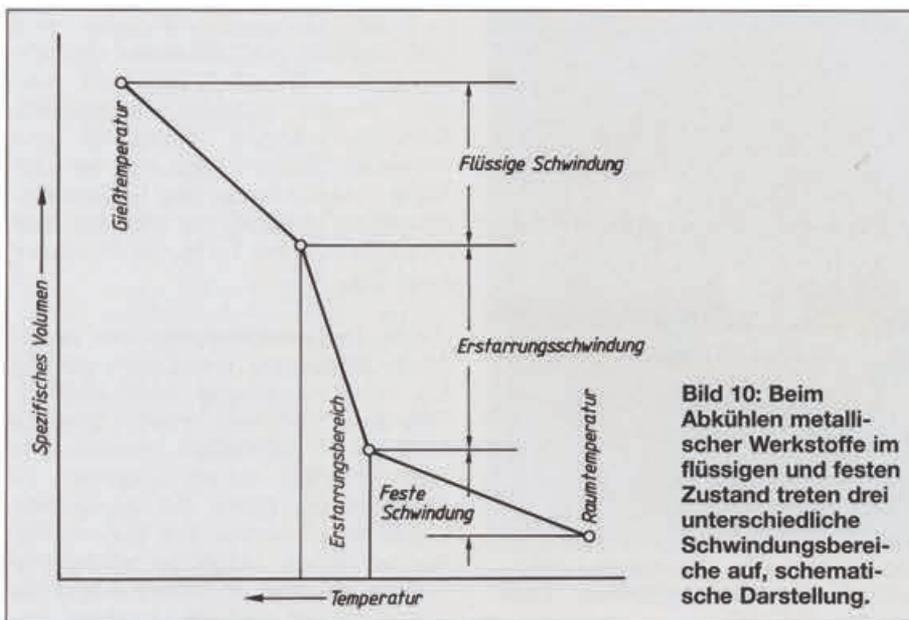
Im Verlauf der weiteren Abkühlung scheidet sich aus dem Austenit entsprechend der Linie ES Kohlenstoff aus, der an den bereits vorhandenen Graphit ankrystallisiert. Bei Erreichen der eutektoiden Temperatur PSK zerfällt der Austenit stabil in Ferrit und Graphit oder metastabil in Ferrit und Eisencarbid; das metastabile Eutektoid wird Perlit genannt.

Gießtechnische Verarbeitbarkeit

Unter gießtechnischer Verarbeitbarkeit versteht man das Verhalten der Schmelze während der Formfüllung und der Gußkörperbildung. Von Bedeutung ist dabei das Gießen, das Erstarren und das Abkühlen, was mit einer Reihe physikalischer Begleiterscheinungen verbunden ist, deren Kenntnis und Beherrschung für eine qualitätsgerechte Gußkörperzeugung wesentlich sind. Bereits bei der Konstruktion sowie bei der Gestaltung des Anschnitt- und Speisersystems kann

dies berücksichtigt werden. Es handelt sich hier um das Fließ- und Formfüllungsvermögen, das Schwinden im flüssigen und festen Zustand sowie die Spannungsbildung.

GJL hat ein sehr gutes Fließ- und Formfüllungsvermögen und eignet sich deshalb ausgezeichnet zum Herstellen komplexer, multifunktionaler und verhältnismäßig dünnwandiger Gußstücke. Dies ist im wesentlichen auf die niedrige Schmelztemperatur und das geringe Erstarrungsintervall bei naheutektischer Zusammensetzung zurückzuführen. Der Erstarrungsbeginn liegt bei etwa 1150 bis 1250 °C und ist damit im Vergleich zu anderen Fe-C-Legierungen niedrig. Daher ist es auch leichter möglich, eine größere Temperaturdifferenz zwischen Gießtemperatur und Erstarrungstemperatur einzustellen und dadurch die Gießbarkeit weiter zu verbessern. Unterstützt kann dies werden durch einen auf etwa 1 % erhöhten Phosphorgehalt. Infolge des guten Formfüllvermögens werden die Konturen am Abguß scharf wiedergegeben.



Schwinden und Schrumpfen

Wie Bild 10 schematisch zeigt, schwindet (schrumpft) ein Werkstoff im flüssigen Zustand, während des Erstarrens und im festen Zustand. Das flüssige Schwinden (von Gießbeginn bis Erstarrungsbeginn) ist im Hinblick auf die Herstellung eines Gußstücks ohne Belang. Beim Schwinden während des Erstarrens (von Erstarrungsbeginn bis -ende) nimmt das Volumen ab, es ist die Ursache für das Entstehen von Volumendefiziten, denen mit Hilfe von sogenannten Speisern entgegen gewirkt wird. Das lineare Schwinden im festen Zustand (von Erstarrungsende bis Raumtemperatur) ist der Grund für maßliche Änderungen und wird mit dem sogenannten Schwindmaß berücksichtigt.

Die Volumenabnahme im flüssigen Zustand wird bis zur eutektischen Zusammensetzung (Punkt C nach Bild 7) mit zunehmendem Sättigungsgrad S_c geringer, darüber hinaus wird sie wieder größer [2]. Entscheidend kann dies vom Kohlenstoffgehalt beeinflusst werden: Bei gleichem Sättigungsgrad wird die Volumenabnahme mit steigendem Kohlenstoffgehalt kleiner. Aus diesen Gründen wird eine möglichst eutektische chemische Zusammensetzung und ein niedriger Siliciumgehalt angestrebt.

Bei der eutektischen Erstarrung wirkt das Ausdehnen des sich ausscheidenden Graphits der Erstarrungsschrumpfung des Austenits entgegen. Bei bestimmten Graphitanteilen halten sich beide die Waage („Eigenspei-



Bild 11: Hängebahnsystem für das Strahlputzen des Rohgusses

Tabelle 1: Spezifische Volumina einzelner Gefügebestandteile von Gußeisen [3]

Gefügebestandteil	Spezifisches Volumen [cm ³ /g]
Ferrit	0,1271
Eisencarbid	0,1301
Austenit (C-gesättigt)	0,1360
Graphit	0,4475

sung“). Bei großer Graphitmenge kann sogar die durch die Bildung des Graphits verursachte Volumenausdehnung größer sein als die Erstarrungskontraktion der metallischen Phase, so daß es insgesamt gesehen zu einer Expansion kommt.

Ursache für die Volumenänderungen im festen Zustand sind die Unterschiede der spezifischen Volumina der verschiedenen Gefügebestandteile (Tabelle 1). Die Volumenänderung ist von verschiedenen Einflußgrößen abhängig. So schwinden einzelne Bereiche bereits, während andere noch erstarren, oder es treten auf Grund des plastischen Verhaltens bei hohen Temperaturen deutliche Auswirkungen der Schwindungsbehinderung auf, deren Ursache die Gußstückkonstruktion (Bild 9), der Formstoff oder die unterschiedlichen Abkühlbedingungen sein

können. Dadurch können innerhalb eines Gußteiles sehr unterschiedliche Schwindungsbeträge auftreten. Das stellt bei Großserien kein Problem dar, da man sich mit Hilfe von Erstmustern und Nullserien „einschießen“ kann, bedeutet aber für Kleinserien oder gar die Einzelfertigung die Notwendigkeit größerer Toleranzen.

Für den Modellbau ist das mittlere lineare Schwindmaß von Bedeutung.

Folgende Richtwerte können für GJL angegeben werden:

1,0 % für leichte und mittlere Gußteile,

0,7 bis 0,8 % für schwere Gußteile,

0,5 bis 0,7 % für Gußstücke mit Schwindungsbehinderung.



Bild 12: Steuerwarte einer Sandaufbereitungsanlage

Einfluß der Legierungselemente

Die Eigenschaften von Gußstücken aus Gußeisen mit Lamellengraphit lassen sich durch Legierungselemente in vielfacher Hinsicht verändern. Ziel legierungstechnischer Maßnahmen ist es, Eigenschaften zu erhalten, die mit unlegiertem Gußeisen nicht erreichbar sind, oder auch Eigenschaften, die zwar mit unlegiertem Gußeisen erzielbar sind, in bestimmten Gußteilen leichter, treffsicherer oder wirtschaftlicher zu erzeugen sind. Niedriglegierte Gußeisensorten sind nicht genormt. Oft sind nominell unlegierte Gußeisen tatsächlich niedrig legiert, da über die Einsatzstoffe Stahlschrott, Kreislaufmaterial oder Spezialroheisen eine merkliche Menge an Legierungs- und Begleitelementen eingebracht wird.



Bild 13: Belüftete Lkw/Omnibusbrems-scheibe aus hochgekohltem, CuCr-legiertem GJL-150

in jedem Gußeisen vorhanden sind und allenfalls zum Einstellen des gewünschten Gehaltes zugesetzt werden. Hierzu gehören Kohlenstoff, Silicium, Mangan, Phosphor und Schwefel. Silicium wird erst bei Gehalten über 3 % zu den Legierungselementen gezählt; für Mangan liegt diese Grenze bei 1,5 %, für Phosphor bei 0,2 %.

Jedes Legierungselement hat spezifische Wirkungen, die sowohl günstig als auch ungünstig sein können. Tabelle 2 vermittelt einen Überblick über die Möglichkeiten, verschiedene Eigenschaften durch Legieren zu beeinflussen, nennt die geeigneten Legierungselemente, ihre Wirkmechanismen sowie mögliche schädliche Nebenwirkungen. In Tabelle 3 sind die praxisüblichen Gehalte genannt. Die

Von den Legierungselementen werden die Begleitelemente unterschieden, die

Tabelle 2: Beeinflussung der Eigenschaften von Gußeisen mit Lamellengraphit durch Legierungselemente, ihr Wirkmechanismus und mögliche Nebenwirkungen

Zielgröße	Element	Wirkmechanismus	Mögliche Nebenwirkungen
Erhöhung der Festigkeit bei Raumtemperatur	Kupfer, Nickel	Perlitisierung, Perlitverfeinerung Verfestigung des Ferrits	–
	Molybdän	dto.	Erhöhte Lunckerneigung
	Stickstoff	dto.	Gasporosität
	Chrom	Perlitisierung, Verfestigung des Ferrits	Bearbeitungsschwierigkeiten
	Zinn	Perlitisierung	Versprödung
Härte und Verschleißbeständigkeit	Kupfer, Nickel, Molybdän, Chrom	s. o.	s. o.
	Zinn	Perlitisierung	Versprödung, Festigkeitsabfall
	Phosphor	Bildung von Hartphasen	Versprödung, Mikrolunkerung
	Vanadium, Niob, Titan	Perlitisierung, Bildung von Sondercarbiden	Erschwerte Bearbeitung
Härtbarkeit	Molybdän, Nickel, Kupfer	Unterkühlen der Austenit- umwandlung (A_1 -Punkt)	–
Warmfestigkeit	Molybdän	Verfestigung des Ferrits	Erhöhte Lunckerneigung
Gefüge- und Wachstumsbeständigkeit	Chrom	Carbidstabilisierung	Erschwerte Bearbeitung
Zunderbeständigkeit	Chrom	Bildung von Deckschichten	Erschwerte Bearbeitung
	Silicium	Bildung von Deckschichten	Starke Ferritisierung
Korrosionsbeständigkeit	Kupfer, Nickel	Bildung von Schutzschichten	–
	Chrom	Bildung von Schutzschichten	Erschwerte Bearbeitung

im Einzelfall gewählten Legierungselemente und ihr Gehalt hängen vom Ziel des Legierens, der Zusammensetzung und den metallurgischen Eigenheiten des Basiseisens sowie der Wanddicke des Gußstücks ab.

Beim Erstarren der Schmelze können die Legierungselemente entweder ähnlich wie Silicium die Grauerstarrung fördern, wie Kupfer und Nickel, oder

die Carbidbildung begünstigen, wie Chrom und Vanadium. Molybdän, Niob und Titan bilden zwar Sondercarbide, verhalten sich aber in den üblichen Gehalten fast neutral.

Im festen Zustand beeinflussen die Legierungselemente die Umwandlung des Austenits zu Ferrit oder Perlit. Eine Ausnahme ist Molybdän, das unter bestimmten Umständen sowohl perliti-

sierend als auch ferritisierend wirken kann. Chrom stabilisiert das Carbid, Nickel, Kupfer und Molybdän senken die Umwandlungstemperatur. Dadurch wird der Perlit feiner und fester, härter und zäher. Weiterhin führen die im Ferrit gelösten Legierungselemente zu einer Mischkristallverfestigung [5, 6].

Vanadium, Niob und Titan werden in der Regel nicht zum Steuern der

Tabelle 3: Übliche Gehalte an Legierungselementen

Element	Gehalt [Masse-%]
Chrom	0,2 bis 0,8
Kupfer	0,4 bis 1,8
Molybdän	0,2 bis 0,8
Nickel	0,5 bis 2
Niob	bis 0,2
Phosphor	0,2 bis 0,8
Stickstoff	bis 0,1
Titan	bis 0,1
Vanadium	bis 0,5
Zinn	0,03 bis 0,1



Bild 14: Verdichtergehäuse aus GJL-250, mit 2,5 % Ni legiert; Gewicht: 2,2 t



Bild 15: Mahlscheibensegmente aus Cr-legiertem GJL-300, Stückgewicht: 10,6 kg

Grundmassenausbildung zugesetzt, sondern zum Erhöhen der Verschleißbeständigkeit durch eingelagerte Sondercarbide.

Festigkeit und Härte

Der Einfluß des Legierens auf Festigkeit und Härte ergibt sich aus dem Zusammenwirken verschiedener Mechanismen. Wird ein teilweise ferritisches Gefüge durch den Legierungszusatz perlitisch, kommt es zu einem steilen Anstieg der Härte und auch der Festigkeit. Bild 16 zeigt dies am Beispiel von Zinn. Im dünnen Querschnitt, der auch ohne Zinn weitgehend perlitisch ist, ist der Härteanstieg durch 0,1 % Zinn mit etwa 20 HB wesentlich geringer als im dicken, wo er fast 60 HB beträgt, weil das Gefüge hier ohne Zinn weitgehend ferritisch, mit Zinn dagegen überwiegend perlitisch ist.

Ist das Gefüge von vornherein völlig oder überwiegend perlitisch, beruht die Wirkung von Legierungselementen auf die Festigkeit nur auf der Verfeinerung des Perlits und auf der Mischkristallhärtung sowie dem Einfluß auf die Carbiddbildung bei der Erstarrung. Bild 18 zeigt den Einfluß von Chrom, Kupfer und Molybdän. Während bei Zusatz von Kupfer Härte und Zugfestigkeit proportional zum Gehalt ansteigen – Nickel wirkt ähnlich –, zeigt sich bei Chrom ein deutliches Maxi-

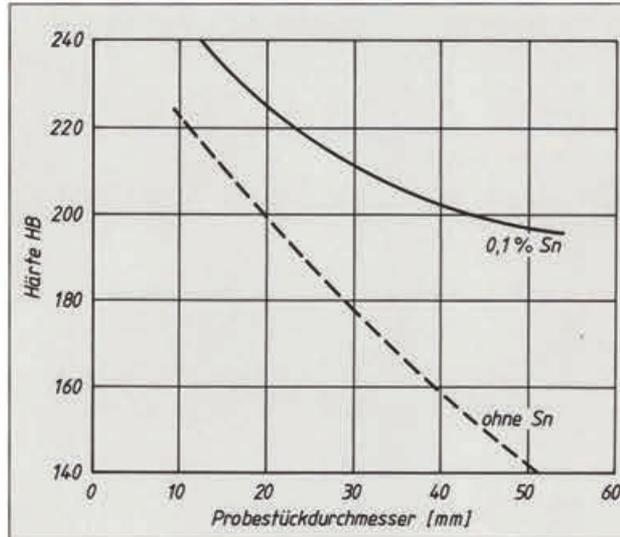


Bild 16: Einfluß von Zinn auf die Härte eines Gußeisens mit Lamellengraphit mit 3,3 % C, 2,15 % Si, 0,4 % Mn und 0,015 % P in Abhängigkeit vom Probestückdurchmesser [7]

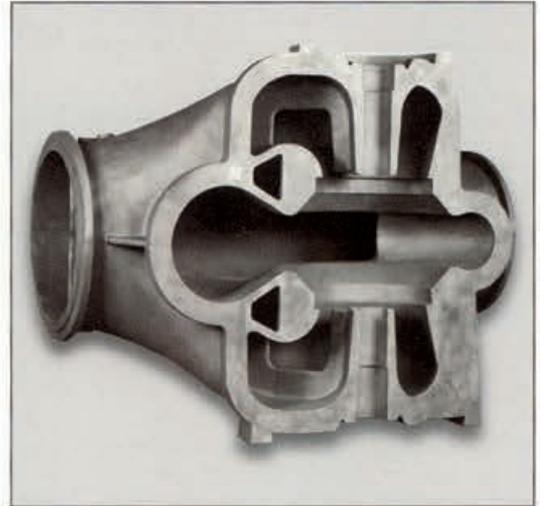


Bild 17: Pumpengehäuse aus mit 2 % Ni legiertem GJL-250; links = Oberteil mit einem Gewicht von 2150 kg, das Gewicht des Unterteils (rechts) beträgt 6,4 t.

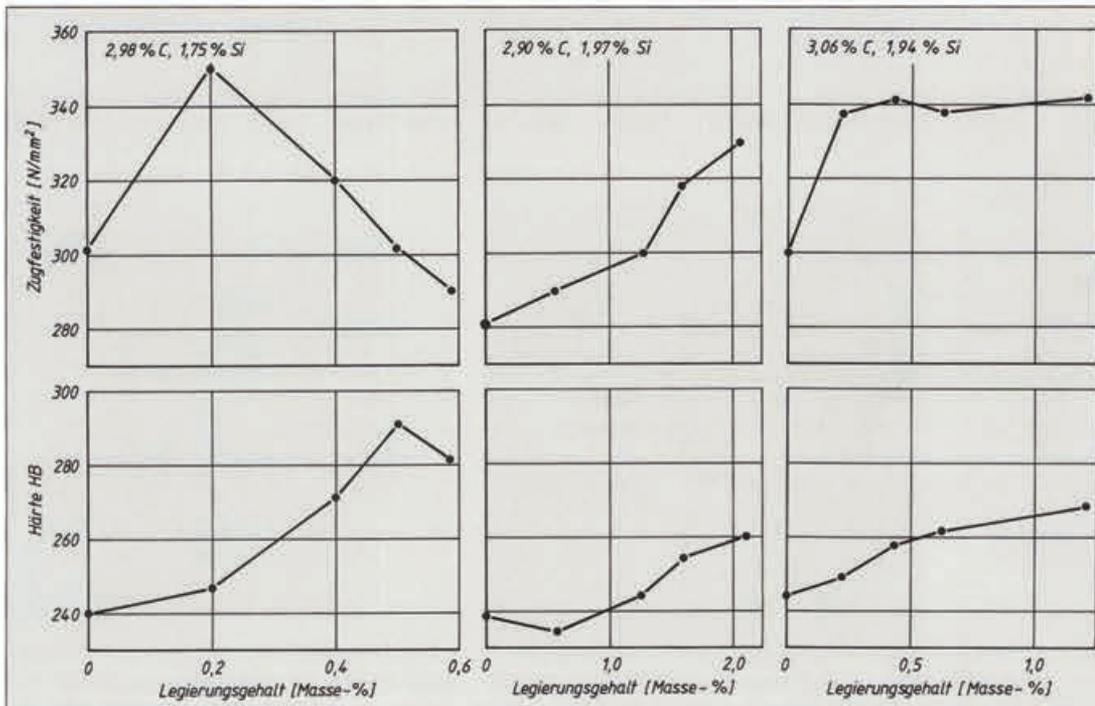


Bild 18: Einfluß von Chrom, Kupfer und Molybdän auf Zugfestigkeit und Härte von Gußeisen mit Lamellengraphit [8]

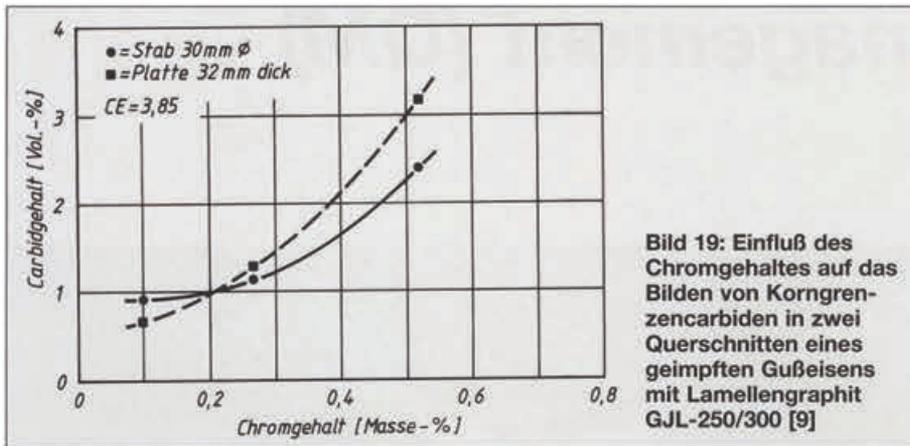


Tabelle 4: Erhöhen der Zugfestigkeit von GJL-250 durch Legierungselemente, Anhaltswerte

Element	Zusatz (Massenanteil)	Erhöhen der Zugfestigkeit [N/mm ²]
Chrom	0,4 %	30 bis 50
Kupfer	1 %	25 bis 30
Molybdän	0,25 %	25 bis 30
Nickel	1 %	15 bis 25
Stickstoff	10 ppm	6 bis 8
Vanadium	0,2 %	25 bis 35

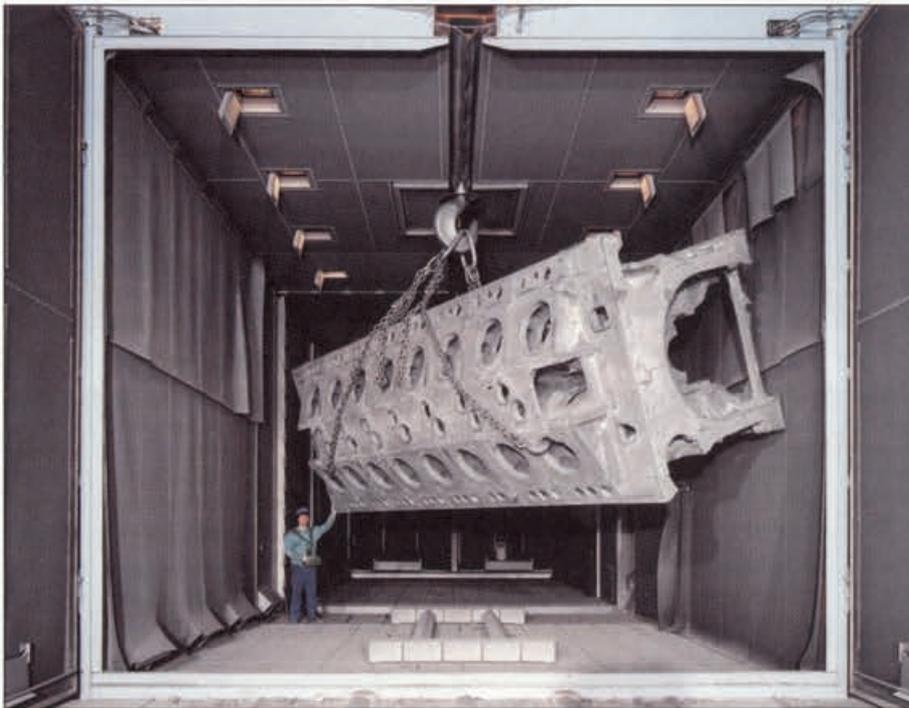


Bild 20: Putzstrahlen eines 16-Zyl.-Motorblocks aus GJL-300 (CrCu-legiert) in einem vollständig gekapselten und mit einer Staubabsaugung ausgerüstetem Putzhaus

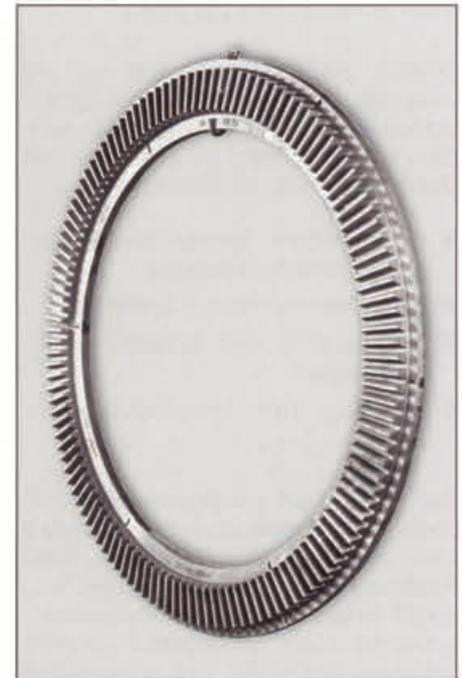


Bild 21: Kegelzahnkranz aus CuNiCr-legiertem GJL-250 mit „Sprengkernen“, Gewicht: 1480 kg

mum und bei Molybdän ein Plateau der Zugfestigkeit, während die Härte weiter zunimmt. Die Ursache ist, daß die beiden carbidbildenden Elemente Chrom und Molybdän bei Überschreiten eines gewissen Gehalts freie Carbide bilden, die bei weiterer Härtesteigerung den Werkstoff verspröden. Die Carbidbildung läßt sich in gewissen Grenzen durch Impfen, kombiniertes Legieren mit Kupfer oder Nickel oder erhöhten Siliciumgehalt zurückdrängen, aber speziell bei Chrom meist nicht völlig vermeiden. Hier kommt es durch Seigerungen zu Chromanreicherungen auf den Korngrenzen, die unabhängig von der Wanddicke zu

einigen Prozent freier Carbide (Bild 19) führen. Diese wirken sich weniger auf die mechanischen Eigenschaften als vielmehr ungünstig auf die Bearbeitbarkeit aus.

Die Erhöhung der Zugfestigkeit durch Legieren ist bei einem überwiegend perlitischen Gefüge kaum von der Festigkeit des Ausgangseisens abhängig. Auch die Graphitmenge und der Sättigungsgrad haben nur einen geringen Einfluß. Dies kann ausgenutzt werden, um bei Gußeisen mit dem für eine hohe Wärmeleitfähigkeit oder Dämpfungsfähigkeit erforderlichen hohen Graphitgehalt noch eine aus-

reichende Festigkeit zu erhalten. Tabelle 4 gibt Anhaltswerte für die durch Legierungszusätze zu erwartende Festigkeitssteigerung. Legierungskombinationen, meist mit Kupfer oder Nickel, sind in der Regel günstiger als ein hoher Zusatz eines Legierungselements allein.

Eine Steigerung der Härte und der Verschleißbeständigkeit sollte nur über die Beseitigung von freiem Ferrit und eine Verfestigung der Grundmasse erreicht werden, ohne daß die für die Bearbeitbarkeit schädlichen freien Carbide auftreten.

Qualitätsmanagement (QM)

Qualitätsbegriff, QM-Normung

Den Begriff Qualität definiert DIN 55350, Teil 11, als Gesamtheit von Eigenschaften und Merkmalen eines Produktes oder einer Tätigkeit, die sich auf deren Eignung zur Erfüllung gegebener Erfordernisse beziehen.

Qualität umfaßt somit nicht nur die Lieferung eines auftrags- und spezifikationsgerechten Gußstückes, sondern auch begleitende Tätigkeiten und Dienstleistungen am Kunden wie

- fachgerechte werkstoffliche und gießtechnische Beratung,
- kurze Kommunikationswege,
- fachgerechte und schnelle Angebotsabgabe,
- Lieferung zum festgesetzten Termin.

Seit Erscheinen der Normenreihe ISO 9000, in Deutschland erstmalig im Mai 1987 als DIN ISO 9000 bis 9004 veröffentlicht, ist die Nachfrage nach zertifizierten Qualitätsmanagementsystemen stark gestiegen; in zunehmendem Maße ist die erfolgreiche Zertifizierung Voraussetzung für die Erlangung von Aufträgen besonders im internationalen Geschäft. Dieser Trend ist in Deutschland von den Gießereien voll aufgenommen worden, die Anzahl zertifizierter Gießereien steigt ständig.

Während die Normenreihe ISO 9000 Anforderungen an QM-Systeme aller Industrie- und Dienstleistungsbereiche abdeckt, richten Zulieferer der Automobilindustrie ihre QM-Aktivitäten zusätzlich an den Regelwerken QS-9000 und VDA 6.1 aus. Basis für beide Regelwerke ist die Norm ISO 9001 erweitert um branchenspezifische Anforderungen der Automobilindustrie, wie

- Qualitätsplanung (APQP),
- Produktionsteil-Abnahmeverfahren (PRAP),
- intensive Nutzung statistischer Methoden,



Bild 22: Optisches Emissionsspektrometer



Bild 23: Anlage zur computergestützten quantitativen Gefügeanalyse

- Fehlermöglichkeits- und Einflußanalyse (FMEA),
- Maschinen-, Prozeß- und Prüfmittelfähigkeitsanalysen,
- ständige Verbesserung von Qualität und Produktivität (KVP).

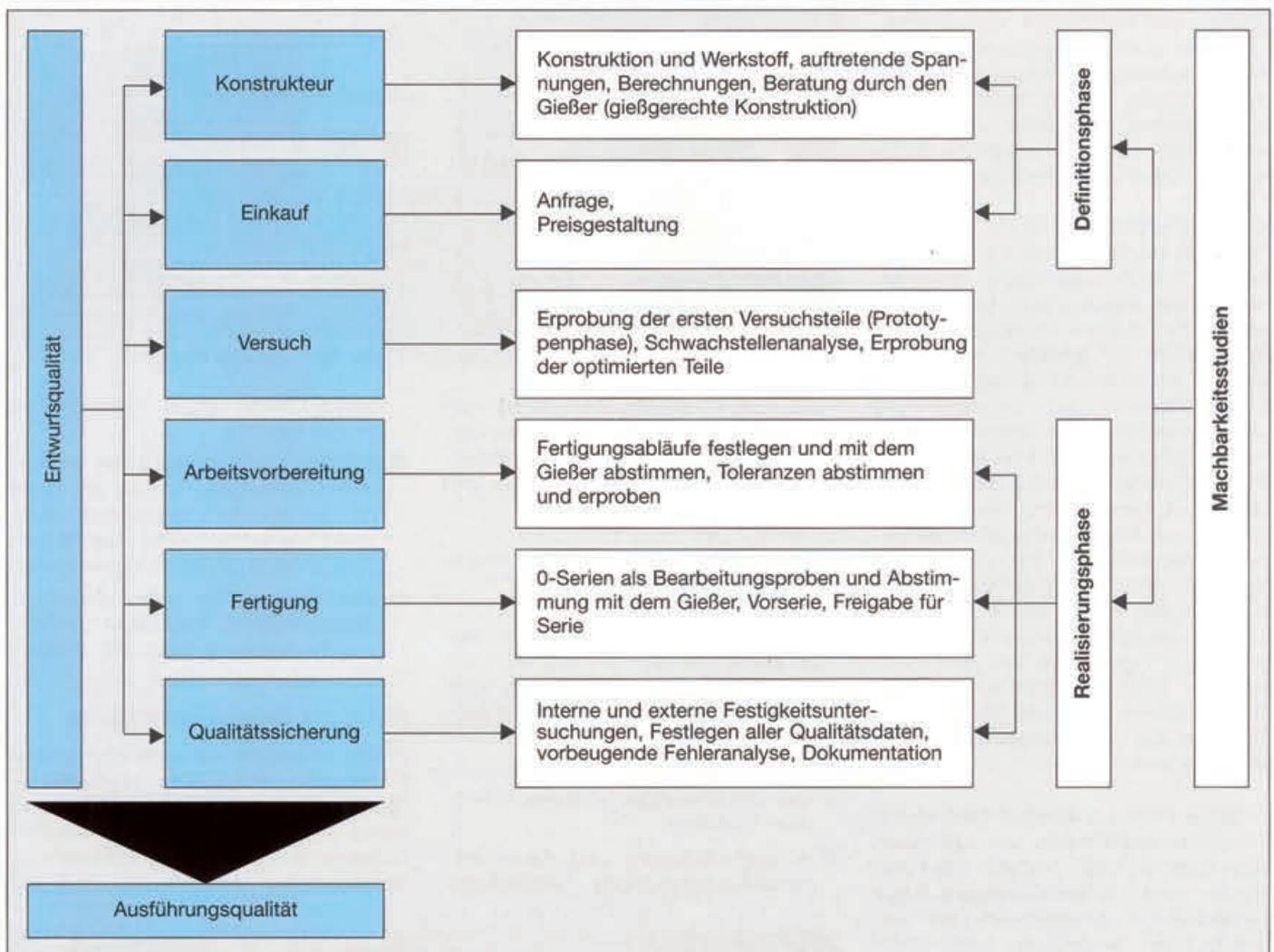
Zwei Abschnitte kennzeichnen die moderne Qualitätssicherung bei der Fertigung von Werkstücken aus Gußeisen mit Lamellengraphit: die Entwurfsqualität und die Ausführungsqualität. Beide Abschnitte bezeichnen zwei Phasen, die bei der Einzelstück-

fertigung zeitlich versetzt hintereinander oder bei der Serienfertigung überlappend ablaufen.

QM in der Produktentwicklung

Im Bild 24 ist das prinzipielle Zusammenspiel zwischen der Gießerei und dem Kunden während der Entwicklungsphase eines Gußstückes dargestellt.

Bild 24: Die Qualitätssicherung beginnt bereits beim ersten Entwurf



Der Grundstein für die Güte eines Gußstückes und seine problemlose, sichere Fertigung mit hoher Produktivität wird bereits im frühesten Stadium der Produktentwicklung – der Konstruktion – gelegt. Durch intensive Beratung muß das Wissen des Konstrukteurs um Einsatzbedingungen, Berechnungsmethoden und Weiterverarbeitungsverfahren gepaart werden mit den werkstofflichen und gießtechnischen Kenntnissen der Gießerei.

Unterstützend wirken heute mehr und mehr selbstverständlich gewordene rechnerunterstützte Techniken wie CAD, FEM, Formfüll- und Erstarrungssimulation oder die Simulation von Eigenspannungen. In einem frühzeitig erstellten Maßnahmenplan werden alle fertigungsbegleitenden, qualitätssichernden, vorbeugenden und prüftechnischen Maßnahmen abgestimmt.

Fertigungssicherheit ist von größter Wichtigkeit und somit zwischen den Fachleuten der Gießerei und des Kun-

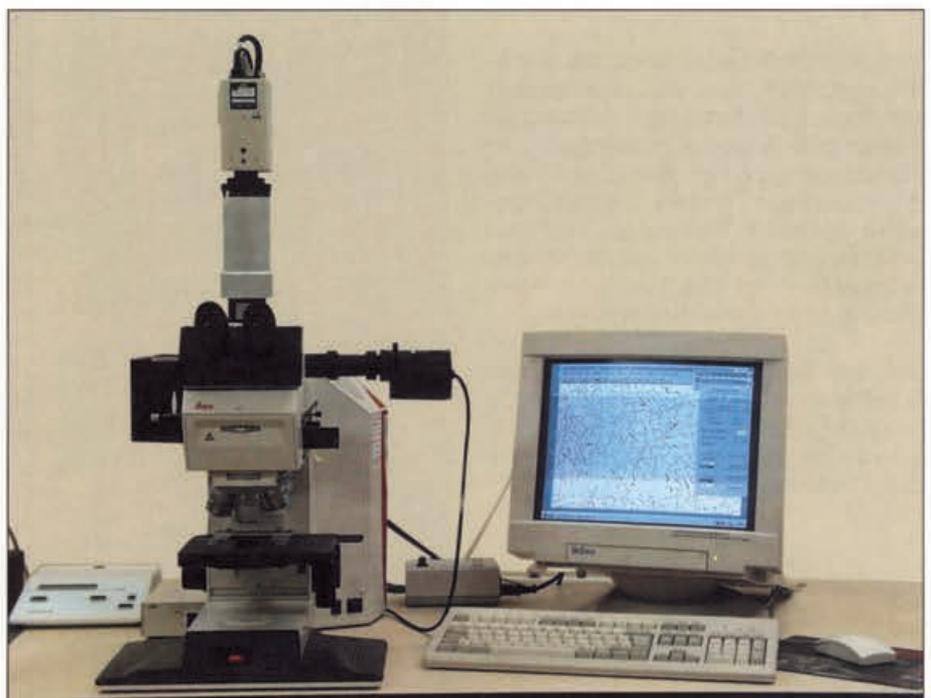


Bild 25: Computergestützter metallographischer Untersuchungsplatz, bestehend aus Mikroskop, Videokamera und Monitor

den zu durchdenken und zu planen. Das gemeinsame Einbringen beider Erfahrungen ermöglicht die Erarbeitung einer anwendungsgerechten Produktspezifikation. Insbesondere bei der Fertigung von Einzelstücken ist eine überaus sorgsame Vorplanung erforderlich, damit ein anwendungsgerechter Abguß auf Anhieb gelingt.

In der Serienfertigung ist die Phase der Produktentwicklung fast nur unter dem Begriff Prototypenfertigung bekannt. Neben der klassischen Vorgehensweise, die ersten Prototypen über Holzmodelle zu erstellen, werden in letzter Zeit vermehrt direkt aus den Computerdaten des Konstrukteurs unter Umgehung der Modellfertigung Formen zur Fertigung von Prototypen erstellt. Gerade bei kernintensiven und verwickelt gestalteten Werkstücken bringt diese Arbeitsweise einen erheblichen Zeitgewinn in der Prototypenfertigung. Rapid-Prototyping besitzt weiterhin den großen Vorteil, daß erforderliche gestaltliche Korrekturen aufgrund der Ergebnisse aus den Prüfstands- und Fertigungsversuchen ohne größere Zeitverluste in neue Abgüsse für Prototypen umgesetzt werden können.

In dieser Phase erarbeiten Gießer und Anwender gemeinsam die optimalen Lösungen für das Produkt, die Fertigungs- und Prüfeinrichtungen durch verschiedene Korrekturen bei der Gießtechnik, Werkstück- und Werkstoffgüte oder Optimierung der Gestaltung des Produktes.

Den Abschluß bildet dann die Realisierungsphase. Aus den Ergebnissen der Prototypenfertigung werden die endgültigen Modelleinrichtungen und Werkzeuge gefertigt, Fertigungs- und Prüfpläne erstellt beziehungsweise optimiert, Fertigungs- und Liefertermine abgestimmt; bei der Serienfertigung erfolgt die Fertigung einer Vorserie unter Serienbedingungen.

Bei der Betrachtung der einzelnen Schritte von der Planung bis zur Fertigung zeigt sich, daß keine Phase der Entwicklung und der Fertigung dem Zufall überlassen ist.

QM in der Ausführung

Auswahl von Zulieferern, Qualität von Zulieferungen

Die Güte von Gußstücken ist in hohem Maße von der Güte der zugelieferten



Bild 26: Computergestützte Härteprüfung mit EDV-Terminal und Monitor

Roh- und Hilfsstoffe und damit vom QM-System der Zulieferer für zum Beispiel Schmelzeinsatzstoffe, Modelleinrichtungen, Feuerfeststoffe, Form- und Kernstoffe abhängig.

Qualitätssichernde Maßnahmen in diesem Teilbereich sind:

- Auswahl der Zulieferer nach den Kriterien von DIN EN ISO 9001/02. In zunehmendem Maße sind auch die Zulieferer der Gießereindustrie zertifiziert.
- Exakte Definition und Vereinbarung der Anforderungen an die zu liefernden Produkte.
- Musterlieferungen und deren Wareneingangsprüfung beziehungs-

weise Bewährung im betrieblichen Probeinsatz.

- Wareneingangsprüfung der laufenden Lieferungen, sofern sie nicht mit untragbarem apparativen Aufwand verbunden sind. Damit verbunden eine Lieferantenbewertung.
- Bestätigung der beim Zulieferer durchgeführten Prüfungen in Prüfbescheinigungen nach EN 10 204.

QM in der Einzelstückfertigung

Während bei der Serienfertigung über Prototypen, Erstmuster und/oder 0-Serien eine Optimierung erfolgt und sogar während der anschließenden Serienproduktion eine kontinuierliche Verbesserung möglich ist, muß bei

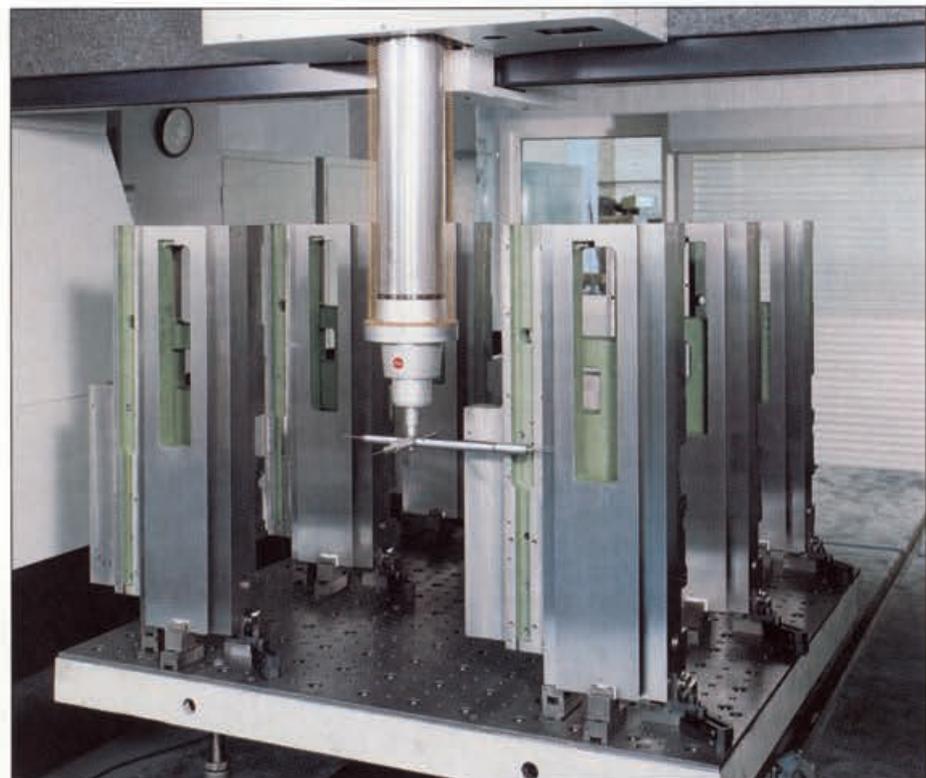


Bild 27: Aufsichtsfreies Messen von 6 Bettschlitten aus GJL-300 auf einer Präzisionsmeßmaschine



Bild 28: Meßmaschine mit Zusatzrechner für das vergleichende Messen von Gußstück, Modell und Werkzeugkonturen

Einzelguß – insbesondere in Anbetracht des hohen Wertes von Großgußstücken – der erste „Schuß“ sitzen. Vorbeugenden planerischen Maßnahmen kommt somit ein erhöhter Stellenwert zu:

- Nutzung der Formfüll- und Erstarungssimulation,
- sorgfältige Prüfung von zugelieferten Hilfsstoffen,
- wirksame Prüfung von Formen und Kernen vor dem Zusammenbau,
- sorgfältige Prüfung der inneren und äußeren Güte der Bauteile mit dokumentierter Fehleranalyse, um daraus Vorbeugemaßnahmen für ähnliche Folgeteile abzuleiten,
- aus dem gleichen Grund Dokumentation des Erfahrungsschatzes in bauteiltypbezogenen Lebensläufen, das heißt geordnete Dokumentation von zum Beispiel Anschnittsystemen, Formenaufbau, Schmelzabläufen, Prüfbefunden.

Jeder Fertigungsschritt wird begleitet von Überwachungs- und Prüfmaßnahmen, die in einer Prüfplanung festgeschrieben und an die Anforderungen an das Bauteil angepaßt sind. Der Erfolg der Maßnahmen wird in erforderlichem Umfang durch Prüfung der inneren und äußeren Bauteilgüte überwacht. Das Ergebnis dieser Prüfungen bestätigt die Gießerei – wenn in der Bestellung so vereinbart – dem Kunden in Prüfbescheinigungen entsprechend EN 10204. Auch die Prüfergebnisse fließen in den dokumentierten Erfahrungsschatz für Folgeaufträge ähnlicher oder gleicher Bauteile zurück.

QM in der Serienfertigung

QM-Maßnahmen in der Serienfertigung unterscheiden sich deutlich von denen in der Einzelfertigung. Wie schon erwähnt ist es möglich, über Prototypen, Erstmuster und Vorserien den erforderlichen Qualitätsstandard zu erarbeiten, andererseits können während der laufenden Serie sich einschleichende Fehler zu plötzlichen Qualitätseinbrüchen bei der erforderlichen Bauteilgüte und ihrer Gleichmäßigkeit führen, was beträchtliche terminliche und finanzielle Probleme zur Folge haben kann. Den Gießereien, die Bauteile aus Gußeisen mit Lamellengraphit in Großserie herstellen, zum Beispiel für die Automobilindustrie, steht ein beachtliches Instrumentarium an Techniken und Methoden zur Verfügung, um einen schnelleren Serienanlauf und hohe Gleichmäßigkeit in der Serie zu erzielen:

- Simulationstechniken,
- Techniken der Versuchsmethodik (zum Beispiel Tagushi),
- Fehlermöglichkeits- und Einflußanalysen (FMEA),
- Qualitätsplanung (APQP),
- Produktionsteil-Abnahmeverfahren (Erstbemusterung, PRAP),
- Maschinen- und Prozeßfähigkeitsanalysen,
- statistische Prozeßsteuerung (SPC).

Überwachung von Prüfmitteln und Prüfeinrichtungen

Im Bild 30 werden übliche Verfahren für die Werkstoff- und Werkstückprüfung für Gußeisen mit Lamellengraphit genannt. Da die Prüfergebnisse nur so zuverlässig wie die Prüfgeräte, -einrichtungen und -systeme sein können,

mit denen sie ermittelt wurden, kommt somit der regelmäßigen Überwachung und Kalibrierung von Prüfmitteln in einem wirkungsvollen QM-System hohe Bedeutung zu:

- handgeführte Meßgeräte werden gewartet und überwacht,
- Spektrometer und Analysengeräte werden durch Analyseneichproben und gegebenenfalls Ringversuche überprüft,
- Temperaturüberwachungsanlagen werden regelmäßig kalibriert,
- Vergleichsmuster für die Sichtprüfung und die Prüfung der Oberflächenrauheit werden vorgehalten,
- Einstellmuster für Maßprüflehren,
- diverse standardisierte Vergleichskörper für die Riß- und Ultraschallprüfung,
- genormte Drahtstege für die Durchstrahlungsprüfung.

Um insbesondere in der Serienfertigung die Streuung von Meßergebnissen beurteilen zu können, ist die Kenntnis um die Wiederholgenauigkeit von Messungen (Reproduzierbarkeit), gegebenenfalls unter Berücksichtigung des Bedienerinflusses (Prüferinfluß), auf die Meßeinrichtung erforderlich. Die Regelwerke der Automobilindustrie, zum Beispiel QS-9000 und VDA 6.1, legen daher einen beachtlichen Stellenwert auf den Nachweis der Prüfmittelfähigkeit. Dabei ist es sicherlich nicht sinnvoll, von handgeführten Standardmeßmitteln für die Maßprüfung – bezogen von namhaften Herstellern – in umfangreichen Meßreihen die Prüfmittelfähigkeit nachzuweisen; hingegen ist aber für Sonderprüfmittel und -einrichtungen zur Überwachung kritischer Bauteilmerkmale eine Fähigkeitsuntersuchung durchaus angebracht.

Kontinuierliche Verbesserung

Um sich gegenüber dem Wettbewerb zu behaupten sowie durch hohe sogenannte Kundenzufriedenheit seinen Kundenstamm zu erhalten und zu vergrößern, kommt Maßnahmen der kontinuierlichen Verbesserung – auch in kleinsten Schritten (jap. Kaizen) – eine nicht zu unterschätzende Bedeutung zu. Dies wird ein fester Bestandteil der demnächst erscheinenden überarbeiteten Normenreihe ISO 9000 ff. sein.

Vorbeugemaßnahmen, unter anderem sorgfältige Fertigungs- und Qualitätsplanung, sollen Fehler erst gar nicht entstehen lassen. Fehleranalysen, daraus abgeleitete Korrekturmaßnahmen

und verfolgt durch Maßnahmenpläne sorgen für eine schnelle und wirksame Fehlerabstellung und vermeiden Wiederholungsfehler. Arbeitstechniken sind:

- Nutzung von Versuchsmethoden,
- Überwachung der Qualitätskosten, insbesondere der Fehlerkosten,
- Problemlösungstechniken,
- Fehlerbaum-Analysen,
- sinnvolle Nutzung statistischer Methoden (SPC, Pareto-Analysen),
- ständige Auswertung von Ausfällen beim Kunden.

Diese Aufzählung kann deutlich erweitert werden. Welche Maßnahmen ergriffen werden, hängt unter anderem davon ab, ob die betreffende Gießerei Einzelguß nach vorgegebener Kundenspezifikation liefert oder in hohem Maße an der Produktentwicklung einbaufertiger Seriengußteile oder Komponenten beteiligt ist.

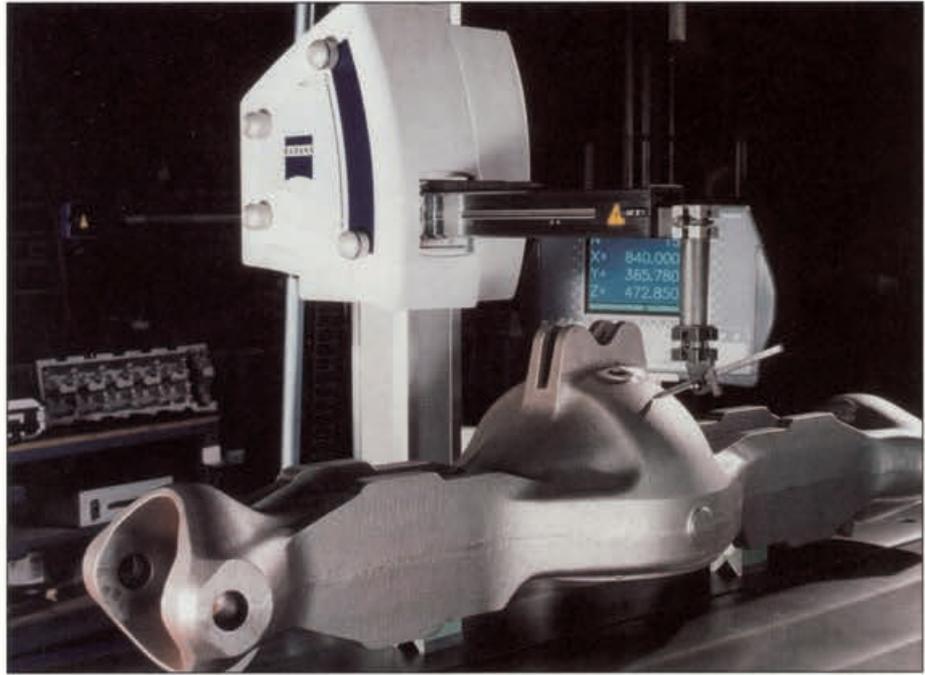
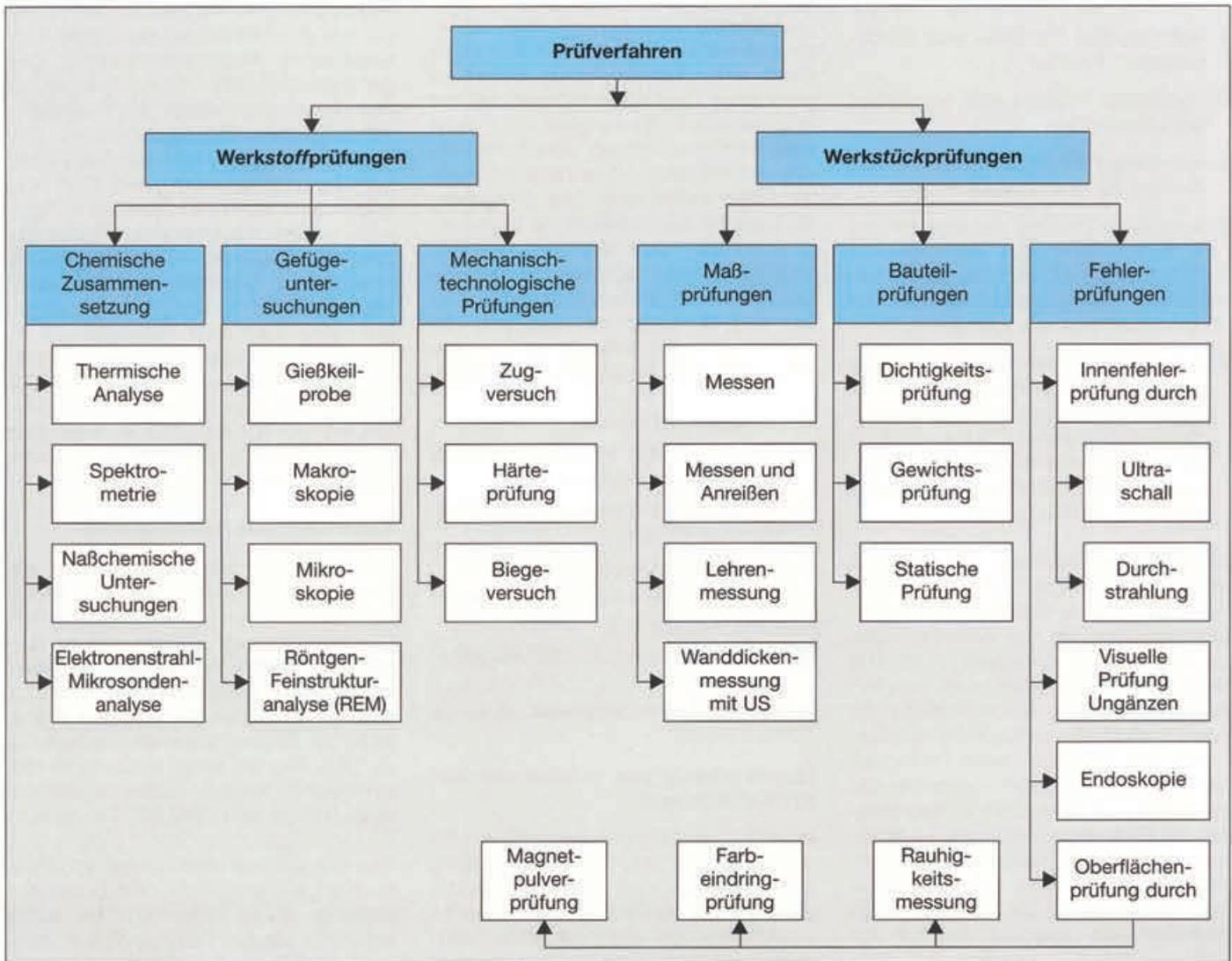


Bild 29: 3D-Vermessen und -Anreißern eines Gußstücks mit zahlreichen Freiformflächen mit Hilfe einer CNC-Meßmaschine

Bild 30: Zahlreiche Prüfverfahren begleiten, überwachen und steuern die Herstellung von Guß



Werkstoffsorten und Eigenschaften

Die Festigkeit metallischer Werkstoffe wird in der Regel vom Grundgefüge bestimmt. So regelt bei Gußeisen mit Kugelgraphit das Ferrit/Perlit-Verhältnis die Sorteneinteilung, vergütete Sorten werden durch die Ausbildung des Grundgefüges festgelegt. Bei Stahl und Stahlguß steigt die Festigkeit mit dem Kohlenstoffgehalt an, das heißt mit steigendem Perlitanteil am Grundgefüge.

Gußeisen mit Lamellengraphit wird dagegen vorwiegend mit perlitischem Grundgefüge gefertigt. Die Sorteneinteilung ergibt sich primär durch die Graphitmenge (und -form) und damit ebenfalls durch den Kohlenstoffgehalt, aber mit umgekehrtem Vorzeichen: Je höher der Kohlenstoffgehalt ist, desto größer ist der (bis über 3 Gewichts- oder über 10 Volumenprozent ansteigende) Graphitgehalt des Gußeisens und desto niedriger ist die Festigkeit. Da man sich meist bemüht, einen gleichmäßig verteilten, nicht zu groben Graphit einzustellen, bleibt als wesentliche Einflußgröße der Kohlenstoffgehalt.

Im August 1997 ist die Europäische Norm DIN EN 1561 in Kraft getreten und ersetzt nach den Regeln des CEN die bisherigen nationalen Normen, in Deutschland DIN 1691. DIN EN 1561 folgt in allen wesentlichen Punkten,

insbesondere was die Zahlenwerte angeht, der letzten Ausgabe von DIN 1691, so daß – bis auf die neuen Bezeichnungen – die Gewöhnung nicht allzu schwer fallen dürfte. Die Systematik der dagegen sicherlich gewöhnungsbedürftigen Werkstoffbezeichnungen (Tabelle 5) ist für alle Gußeisenwerkstoffe in DIN EN 1560 (Gießereiwesen, Bezeichnungssystem für Gußeisen, Werkstoffkurzzeichen und Werkstoffnormen) festgelegt.

Die Sorteneinteilung von Gußeisen mit Lamellengraphit (GJL) beruht, wie bei fast allen metallischen Konstruktionswerkstoffen, auf der Zugfestigkeit, Tabelle 6, eine Besonderheit ist die zusätzliche Einteilung nach der Härte, Tabelle 7. Diese Zweiteilung berücksichtigt, ob für die Weiterverarbeitung oder die Verwendung der Gußstücke die Zugfestigkeit oder die Härte (zum Beispiel für die spanende Bearbeitung von Serienteilen) die entscheidende Eigenschaft ist.

Zugproben können nach Norm an Proben aus getrennt gegossenen Probestücken, an Proben aus angegossenen Probestücken oder an Proben ermittelt werden, die Gußstücken entnommen wurden. Grund für die Aufnahme angegossener Probestücke ist der Einfluß unterschiedlicher Abkühlgeschwindigkeit auf die Eigenschaften: Ein Probe-

stück von 30 mm Durchmesser ist etwa 2,5 Minuten nach dem Abguß vollständig erstarrt, bei 100 mm Wanddicke dauert dies etwa 100 Minuten. Dieser Unterschied macht deutlich, daß für schwere Gußstücke der Meßwert der Zugfestigkeit aus einer getrennt gegossenen Probe von 30 mm Rohgußdurchmesser keine brauchbare Aussage über die Festigkeit im Gußstück zuläßt [10].

Die in Tabelle 7 angegebenen Härtebereiche sind zwangsläufig recht groß, weil die Relation zwischen Zugfestigkeit und Härte nicht linear ist, und zudem von den Einsatzstoffen sowie der Verfahrenstechnik abhängig sind. Die Prüfung der Härte ist viel einfacher als die der Zugfestigkeit durchzuführen und zudem zerstörungsfrei oder zumindest ohne große Beschädigung auch am Gußstück möglich. Eine direkte Härteprüfung am Bauteil kann jedoch bei mittelschweren und schweren Gußstücken schwierig bis unmöglich sein. Für diesen Fall ist in der Norm ein angegossener, kegelförmiger Prüfklotz vorgesehen, der vom Gußstück abgetrennt und nach entsprechender Probenvorbereitung auf der Trennfläche härtegeprüft wird. Wird das Gußstück wärmebehandelt, so wird der Prüfklotz selbstverständlich erst nach der Wärmebehandlung abgetrennt.

Tabelle 5: Gegenüberstellung der neuen Werkstoffbezeichnungen nach DIN EN 1561 zu den früheren nach DIN 1691

Werkstoff nach DIN 1691		Werkstoff nach DIN EN 1561	
Kurzzeichen	Nummer	Kurzzeichen	Nummer
Kennzeichnendes Merkmal: Zugfestigkeit			
GG-10	0.6010	EN-GJL-100	EN-JL-1010
GG-15	0.6015	EN-GJL-150	EN-JL-1020
GG-20	0.6020	EN-GJL-200	EN-JL-1030
GG-25	0.6025	EN-GJL-250	EN-JL-1040
GG-30	0.6030	EN-GJL-300	EN-JL-1050
GG-35	0.6035	EN-GJL-350	EN-JL-1060
Kennzeichnendes Merkmal: Härte HB			
GG-150 HB	0.6012	EN-GJL-HB155	EN-JL-2010
GG-170 HB	0.6017	EN-GJL-HB175	EN-JL-2020
GG-190 HB	0.6022	EN-GJL-HB195	EN-JL-2030
GG-220 HB	0.6027	EN-GJL-HB215	EN-JL-2040
GG-240 HB	0.6032	EN-GJL-HB235	EN-JL-2050
GG-260 HB	0.6037	EN-GJL-HB255	EN-JL-2060

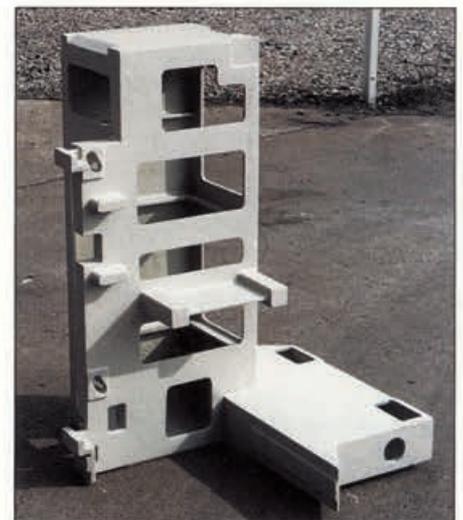


Bild 31: Abbrichtständer aus GJL-200 für eine Kehlmaschine, Abmessungen: 1110 x 830 x 830 mm, Gewicht: 192 kg

Der Umgang mit DIN EN 1561 ist aufgrund der Wanddickenabhängigkeit (entsprechend den Spalten „Maßgebende Wanddicke“ in den Tabellen 6 und 7) nicht ganz einfach. Hinzu kommen weitere Punkte, die bei der Anwendung der Werkstoffnorm zu beachten sind:

- Überlappung der Sorten: Die Zugfestigkeit von GJL-200 reicht von 200 bis 300 N/mm², die von GJL-250 von 250 bis 350 N/mm². Daher kann ein Werkstoff mit der Nominalfestigkeit 270 N/mm² zu beiden Sorten gehören.
- Begrenzen der Wanddicke nach unten wegen der Gefahr der Weißeinstrahlung, die mit sinkendem Sättigungsgrad, das heißt mit steigender Festigkeit, zunimmt. Daher wird die Mindestwanddicke für zum Beispiel GJL-300 und -350 auf 10 mm, für GJL-150 auf 2,5 mm begrenzt.
- Der Anwendungsbereich getrennt gegossener 30-mm-Proben sollte wegen der nur geringen Aussage-sicherheit über die Eigenschaften in sehr großen Werkstücken und/oder Wanddicken als Regelprobe auf leichte (bis 200 kg) bis mittelschwere Gußteile (bis 1000 kg) beschränkt werden.
- Es ist grundsätzlich nicht möglich, einen Bereich für die Zugfestigkeit und gleichzeitig einen Bereich für die Härte zu garantieren, da – anders als bei einem funktionalen Zusammenhang – zu jedem Einzelwert von einer der beiden Größen ein ganzer Bereich des jeweils anderen Merkmals gehört (Bild 32).

- Unterscheidung zwischen Eigenschaften in der Probe und im Stück. Dabei werden in getrennt gegossenen und in angegossenen Proben Eigenschaften garantiert, während die Stückeigenschaften nur als Anhaltswerte („Erwartungswerte“) angegeben werden können, wie aus den Angaben zur Zugfestigkeit in Tabelle 6 zu entnehmen ist.

Anhaltswerte zu weiteren mechanischen Eigenschaften nennt *Tabelle 8*.

Indirektes Bestimmen der Zugfestigkeit

Bei Gußeisen mit Lamellengraphit besteht aus mehreren Gründen die Notwendigkeit einer indirekten Bestimmung der Zugfestigkeit:

Tabelle 6: Zugfestigkeit von Gußeisen mit Lamellengraphit nach DIN EN 1561¹⁾

Werkstoffbezeichnung		Maßgebende Wanddicke ²⁾ [mm]		Zugfestigkeit R _m ³⁾ einzuhaltende Werte		Zugfestigkeit R _m ⁵⁾ Erwartungswerte im Gußstück ⁶⁾ [N/mm ²]
				im getrennt gegossenen Probestück ⁴⁾ [N/mm ²]	im angegossenen Probestück [N/mm ²]	
Kurzzeichen EN-GJL-	Nummer EN-JL	über	bis	min.	min.	min.
100	1010	5 ⁷⁾	40	100 bis 200 ⁸⁾	–	–
150	1020	2,5 ⁷⁾	5	150 bis 250 ⁸⁾	–	180
		5	10		–	155
		10	20		–	130
		20	40		120	110
		40	80		110	95
		80	150		100	80
150	300	90 ⁶⁾	–			
200	1030	2,5 ⁷⁾	5	200 bis 300 ⁸⁾	–	230
		5	10		–	205
		10	20		–	180
		20	40		170	155
		40	80		150	130
		80	150		140	115
150	300	130 ⁶⁾	–			
250	1040	5 ⁷⁾	10	250 bis 350 ⁸⁾	–	250
		10	20		–	225
		20	40		210	195
		40	80		190	170
		80	150		170	155
		150	300		160 ⁶⁾	–
300	1050	10 ⁷⁾	20	300 bis 400 ⁸⁾	–	270
		20	40		250	240
		40	80		220	210
		80	150		210	195
		150	300		190 ⁶⁾	–
		350	1060		10 ⁷⁾	20
20	40			290	280	
40	80			260	250	
80	150			230	225	
150	300			210 ⁶⁾	–	

¹⁾ Die fett gedruckten Zahlen geben die Mindestzugfestigkeit an, der das Kurzzeichen der Sorte zugeordnet ist.

²⁾ Wenn ein angegossenes Probestück verwendet werden soll, muß die maßgebende Wanddicke des Gußstücks bis zum Zeitpunkt der Annahme der Bestellung vereinbart werden.

³⁾ Wenn bis zum Zeitpunkt der Annahme der Bestellung der Nachweis der Zugfestigkeit vereinbart wurde, ist auch der Probestücktyp in der Bestellung festzulegen. Liegt keine Vereinbarung vor, ist der Probestücktyp dem Ermessen des Herstellers zu überlassen.

⁴⁾ Zum Zweck der Annahme muß die Zugfestigkeit einer gegebenen Sorte zwischen ihrem Nennwert n (Ziffernfolge des Werkstoffkurzzeichens) und (n + 100) N/mm² liegen.

⁵⁾ Diese Spalte enthält Richtwerte für die voraussichtliche Änderung der Zugfestigkeit bei unterschiedlichen Wanddicken, wenn ein Gußstück von einfacher Form und gleichmäßiger Wanddicke aus einem bestimmten Gußeisen mit Lamellengraphit gegossen wird. Für Gußstücke mit unterschiedlicher Wanddicke und solche mit Kernbohrungen sind die Werte in der Tabelle lediglich Schätzwerte, die Konstruktion sollte auf in kritischen Gußstückbereichen gemessenen Zugfestigkeiten aufgebaut sein.

⁶⁾ Diese Werte sind Anhaltswerte; sie sind nicht zwingend vorgeschrieben.

⁷⁾ Dieser Wert ist als untere Grenze für den Bereich der maßgebenden Wanddicke eingeschlossen.

⁸⁾ Die Werte beziehen sich auf Proben mit einem Rohgußdurchmesser von 30 mm; dies entspricht einer maßgebenden Wanddicke von 15 mm.

- Die Werkstoff-Festlegung vor dem Guß kann nur über die chemische Zusammensetzung der Einsatzstoffe – also indirekt – erfolgen, die Festigkeit kann nicht „gattiert“ werden.
- Die Bedeutung von Abweichungen der chemischen Zusammensetzung der Schmelze vom Sollwert kann nur geschätzt werden; ob sie also korrigiert werden muß, ist nur über eine indirekte Festigkeitsbestimmung möglich.

Tabelle 7: Brinellhärte von Gußstücken aus Gußeisen mit Lamellengraphit nach DIN EN 1561, zwingend vorgeschriebene Werte (für die Referenzwanddicke 40 bis 80 mm) und Erwartungswerte an der vereinbarten Prüfstelle¹⁾

Werkstoffbezeichnung		Maßgebende Wanddicke [mm]		Härte ^{2, 3)} HB 30		
Kurzzeichen EN-GJL-	Nummer EN-JL	über	bis	min.	max.	
HB155	2010	40 ⁴⁾	80	–	115	
		20	40	–	160	
		10	20	–	170	
		5	10	–	185	
		2,5	5	–	210	
HB175	2020	40 ⁴⁾	80	100	175	
		20	40	110	185	
		10	20	125	205	
		5	10	140	225	
		2,5	5	170	260	
HB195	2030	40 ⁴⁾	80	120	195	
		20	40	135	210	
		10	20	150	230	
		5	10	170	260	
		4	5	190	275	
HB215	2040	40 ⁴⁾	80	145	215	
		20	40	160	235	
		10	20	180	255	
		5	10	200	275	
HB235	2050	40 ⁴⁾	80	165	235	
		20	40	180	255	
		10	20	200	275	
HB255	2060	40 ⁴⁾	80	185	255	
		20	40	200	275	

- ¹⁾ Die fett gedruckten Zahlen geben die minimale und maximale Brinellhärte, welcher das Kurzzeichen der Sorte zugeordnet ist, sowie die entsprechenden Grenzbereiche der maßgebenden Referenzwanddicke an.
²⁾ Bei jeder Sorte nimmt die Härte mit zunehmender Wanddicke ab.
³⁾ Wenn zwischen Hersteller und Besteller vereinbart, darf für eine vereinbarte Stelle des Gußstücks einem engeren Härtebereich zugestimmt werden, vorausgesetzt, er ist nicht enger als 40 Brinellhärteeinheiten. Ein Beispiel dafür könnten Gußstücke in Großserienfertigung sein.
⁴⁾ Maßgebende Referenzwanddicke für die Sorte

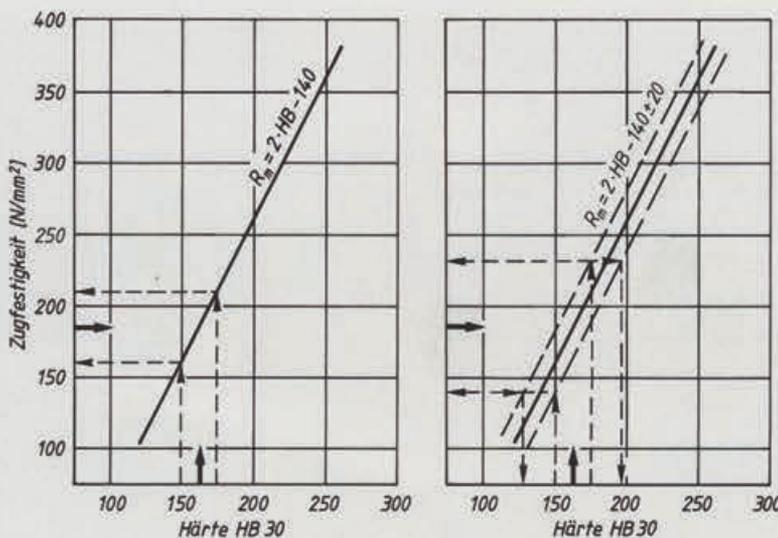


Bild 32: Nur jeweils eines der in einem solchen Streufeld zusammenhängenden Merkmale läßt sich als Garantiewert nutzen [4].

- Die direkte Bestimmung der Eigenschaften eines fertigen Gußstücks ist zerstörungsfrei nicht möglich.
- Noch schwieriger ist die häufig notwendige, nachträgliche Ermittlung der Sortenzugehörigkeit eines Gußstückes.

Menge und Form des Graphits als die die Werkstoffsorte bestimmenden Größen werden vorwiegend durch die chemische Zusammensetzung und die Abkühlbedingungen (Gußteilgewicht, Wanddicken des Gußteils, Formstoff) beeinflusst, daneben aber auch durch den Keimzustand und durch eine Schmelzebehandlung (Impfen). Da bei GJL das Grundgefüge überwiegend perlitisch ist und einige Einflußgrößen recht konstant bleiben, läßt sich die Zugfestigkeit im allgemeinen relativ gut indirekt bestimmen, so aus der chemischen Zusammensetzung oder der Brinellhärte.

Eine der am häufigsten verwendeten Formeln zur indirekten Bestimmung der Zugfestigkeit R_m unter Berücksichtigung der chemischen Zusammensetzung ist nach [11]:

$$R_m = 1002 - 810 \times S_c \quad [\text{N/mm}^2] \quad (1)$$

Dabei wird die chemische Zusammensetzung vom Sättigungsgrad S_c (hier nach [12] zusammengefaßt):

$$S_c = \%C / (4,23 - 0,31 \times \%Si - 0,33 \times \%P + 0,066 \times \%Mn) \quad (2)$$

Der Sättigungsgrad ist ein Maß für die Annäherung an die eutektische Zusammensetzung im Eisen-Kohlenstoff-Mehrstoffsystem, oder, anders ausgedrückt, er gibt das Verhältnis des Kohlenstoffgehaltes im Stück zum eutektischen Kohlenstoffgehalt bei der vorliegenden chemischen Zusammensetzung an.

Ohne den Umweg über den Sättigungsgrad wird auch diese Formel benutzt [13]:

$$R_{m30} = 788 - 150 \times \%C - 47,4 \times \%Si - 44,8 \times \%Mn + 219 \times \%S \quad [\text{N/mm}^2] \quad (3)$$

Reststreuung $S_R = 25,1 \text{ N/mm}^2$
 Bestimmtheitsmaß $B = 76 \%$

Die Formeln (2) und (3) gelten strenggenommen nur für Gußteile mit einer maßgeblichen Wanddicke von 15 mm und für getrennt gegossene 30-mm-Probestäbe (daher R_{m30}), das heißt aber auch zur Bestimmung der Sortenzugehörigkeit aus der chemischen Zusammensetzung.

Tabelle 8: Mechanische Eigenschaften in getrennt gegossenen Proben mit 30 mm Rohgußdurchmesser

Merkmal	Werkstoffbezeichnung EN-GJL-...					Schrifttum	
	150	200	250	300	350		
Grundgefüge	ferritisch/ perlitisch	perlitisch					
Zugfestigkeit	R_m [N/mm ²]	150 bis 250	200 bis 300	250 bis 350	300 bis 400	350 bis 450	
0,1%-Dehngrenze	$R_{p0,1}$ [N/mm ²]	98 bis 165	130 bis 195	165 bis 228	195 bis 260	228 bis 285	[16]
Bruchdehnung	A [%]	0,8 bis 0,3	[17]				
Druckfestigkeit	σ_{db} [N/mm ²]	600	720	840	960	1080	[16]
0,1%-Stauchgrenze	$\sigma_{d0,1}$ [N/mm ²]	195	260	325	390	455	[16]
Biegefestigkeit	σ_{bB} [N/mm ²]	250	290	340	390	490	[16]
Scherfestigkeit	σ_{aB} [N/mm ²]	170	230	290	345	400	[16]
Torsionsfestigkeit ¹⁾	τ_{tB} [N/mm ²]	170	230	290	345	400	[16]
Elastizitätsmodul ²⁾	E [kN/mm ²]	78 bis 103	88 bis 113	103 bis 118	118 bis 137	123 bis 143	[16]
Poisson-Zahl	ν -	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	[17]
Biegewechsel- festigkeit ³⁾	σ_{bW} [N/mm ²]	70	90	120	140	145	[26]
Zug-Druck- Wechselfestigkeit ⁴⁾	σ_{zdW} [N/mm ²]	40	50	60	75	85	[26]

¹⁾ Torsionswechselfestigkeit $\tau_{tW} = 0,42 \times R_m$ [26]

²⁾ Abhängig von Menge und Ausbildungsform des Graphits sowie von der Belastung

³⁾ Näherungsweise gilt: $\sigma_{bW} = 0,35$ bis $0,50 \times R_m$ [26]

⁴⁾ Näherungsweise gilt: $\sigma_{zdW} = 0,53 \times \sigma_{bW} = 0,26 \times R_m$ [26]

Mit den gleichen Einflußgrößen lassen sich auch die Brinellhärte und der E-Modul errechnen [13]:

$$HB\ 30 = 444 - 71,2 \times \%C - 13,9 \times \%Si + 21 \times \%Mn + 170 \times \%S \quad [N/mm^2] \quad (4)$$

$$S_R = 12,5\ N/mm^2$$

$$E_{030} = 313 - 49 \times \%C - 14,1 \times \%Si \quad [kN/mm^2] \quad (5)$$

$$S_R = 12,5\ kN/mm^2$$

Die Hinzunahme der Brinellhärte des Gußteiles (als Maß für die Abkühlgeschwindigkeit am Ort der Härtemessung) erweitert die Anwendungsmöglichkeit auf die indirekte Bestimmung der Festigkeit in Gußteilen, verringert die Reststreuung S_R und erhöht das Bestimmtheitsmaß B [13]:

$$R_m = 258,4 + 1,24 \times HB - 63,8 \times \%C - 25,1 \times \%Si - 31,3 \times \%P \quad [N/mm^2] \quad (6)$$

$$S_R = 20,9\ N/mm^2$$

$$B = 85\%$$

Zusammenhang zwischen Zugfestigkeit und Härte

Bei GJL darf die Brinellhärte nicht in Zugfestigkeit umgerechnet werden, was bei Stahl und Stahlguß unter Verwendung dieser Formel

$$R_m = (3,4\ \text{bis}\ 3,6) \times HB \quad [N/mm^2] \quad (7)$$

häufig geschieht. Bei Gußeisen mit *Kugelgraphit* könnte die Formel

$$R_m = (3,0\ \text{bis}\ 3,3) \times HB \quad (8)$$

benutzt werden. Bei Gußeisen mit *Lamellengraphit* ist die Proportionalität zwischen R_m und HB nur abschnittsweise linear (*Bild 35*), der Umrechnungsfaktor liegt zwischen 2,0 und 2,8. Eine der gelegentlich verwendeten Formeln nach [15] ist

$$R_m = 2,33 \times HB - 234 \quad [N/mm^2] \quad (9)$$

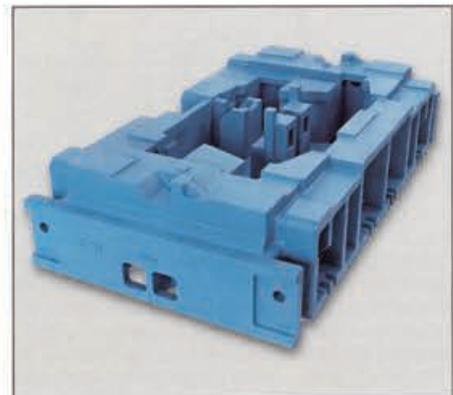
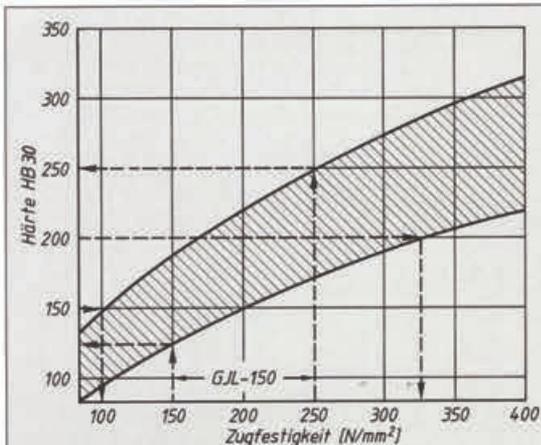


Bild 33: Werkzeugrahmen aus GJL-250 für die Blechbearbeitung, Gewicht: 4,3 t



Bild 34: Kühlmantel aus GJL-250 für eine ölgekühlte Tauchpumpe, Gewicht: 550 kg



Beispiel: Zu GJL-150 mit R_m zwischen 150 und 250 N/mm^2 gehört ein Härtebereich von 125 bis 250 HB 30. Zu dem wesentlich engeren, darin etwa mittig liegendem Bereich 150 bis 200 HB 30 gehört jedoch ein Festigkeitsbereich von 100 bis 325 N/mm^2 .

Bild 35: Härte und Zugfestigkeit hängen bei GJL nicht linear voneinander ab [14].

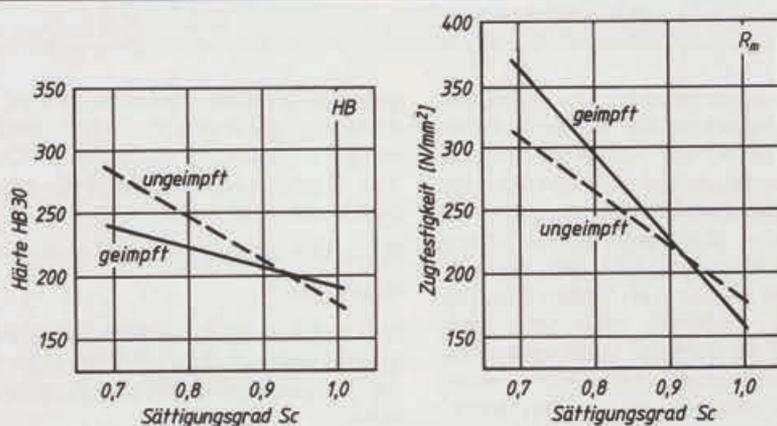


Bild 36: Geimpftes Gußeisen weist eine höhere Festigkeit, aber eine niedrigere Härte und damit eine bessere Bearbeitbarkeit auf als ungeimpftes [4].

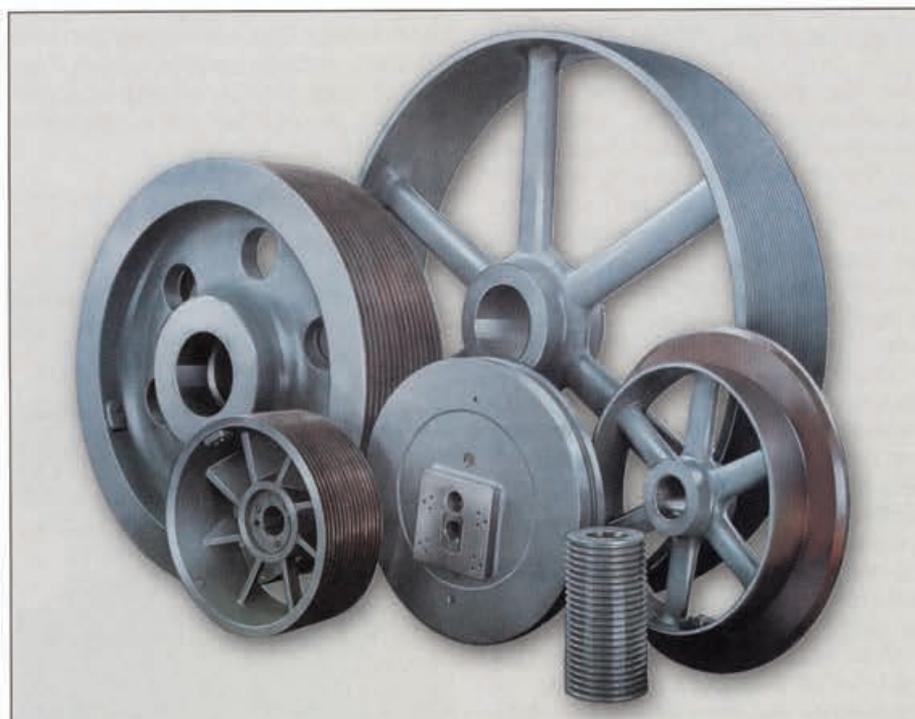


Bild 37: Riemenscheiben in verschiedenen Abmessungen und Formen aus GJL-200 oder -250

Das Verhältnis von Zugfestigkeit und Härte wird durch eine sogenannte Impfbehandlung (Desoxidation) nachhaltig beeinflusst, wie Bild 36 zeigt. Durch das Impfen wird im Bereich niedriger Sättigungsgrade, also höherer Festigkeit, das Verhältnis R_m/HB zu größeren Werten verschoben, also bei gleicher Festigkeit eine niedrigere Härte und damit eine bessere Bearbeitbarkeit erreicht. Außerdem wird die Gefahr der Weißeinstrahlung an Kanten (Kantenhärte) oder in dünnen Wänden verringert.

Druckfestigkeit und Stauchung

Der Druckversuch wird üblicherweise an Probekörpern mit einem Verhältnis von Höhe zu Durchmesser von 2:1 durchgeführt. Bei kleinerem Verhältnis ergeben sich höhere, bei größerem niedrigere Werte für die Druckfestigkeit. GJL bricht üblicherweise bei der Maximallast [16], während sich duktile Werkstoffe wie Gußeisen mit Kugelgraphit plastisch verformen und durch die Zunahme des Querschnitts beim Verformen höhere Belastungen ertragen, die dann aber auf den größeren Querschnitt zu beziehen wären. Man kann also bei duktilen Werkstoffen keine Druckfestigkeit, sondern nur Quetsch- oder Stauchgrenzen für eine bestimmte bleibende Verformung bestimmen.

Die Druckfestigkeit von GJL beträgt ein Mehrfaches der Zugfestigkeit, weil der Graphit zwar Druckkräfte, aber keine Zugkräfte übertragen kann. Daher ordnet sich sein Druckverhalten recht gut in das anderer Fe-C-Werkstoffe ein, die Zugfestigkeit ist aber durch den Einfluß des Lamellengraphits deutlich niedriger. Bei GJL beträgt das Verhältnis von Druckfestigkeit zu Zugfestigkeit etwa 3 bis 4:1 [17, 18], das Verhältnis nimmt mit zunehmender Festigkeit ab.

Ähnlich wie die Zugfestigkeit wird auch die Druckfestigkeit durch den Zusatz von Legierungselementen erhöht. Die Wirkung erfolgt ausschließlich über eine Festigkeitssteigerung der metallischen Grundmasse. Die carbidstabilisierenden Elemente haben hier den größten Einfluß. 0,1 bis 0,3 % Vanadium erhöhen die Druckfestigkeit um 10 bis 20 %, 0,5 % Chrom um etwa 16 % und 0,5 % Molybdän um etwa 30 %. Nickel und Kupfer erhöhen die Druckfestigkeit nur geringfügig.

Das Verformungsverhalten von GJL unter Druckbeanspruchung ist um

mehr als eine Größenordnung besser als unter Zugbeanspruchung. Unlegiertes GJL-150 hat eine Bruchstauchung von etwa 9 %, GJL-300 etwa 15 % [18]. Angaben über den Einfluß von Legierungszusätzen auf die Druckverformbarkeit werden im Schrifttum nicht erwähnt und wären auch für eine Werkstoffbewertung von nur geringer Bedeutung, da das Verformungsvermögen unter Druck im statischen Belastungsfall nicht ausgenutzt werden kann und bei dynamischer Belastung nicht zum Tragen kommt.

Kriechverhalten unter Zug- und Druckbelastung

Bei allen GJL-Sorten – sowohl den niedrig- als auch den hochfesten – treten während längerer Beanspruchung unter gleichbleibender Belastung plastische Verformungen (Kriechen) auf, wenn die Spannungen über 30 bis 35 % der Zugfestigkeit oder über 20 bis 25 % der Druckfestigkeit hinausgehen [17, 18]. Die durch Kriechen verursachten bleibenden Verformungen wachsen mit steigenden Spannungen im Druckgebiet stärker als im Zuggebiet. Derartige Beanspruchungen treten mit zunehmender Tendenz zur Werkstoffauslastung im heutigen Maschinen- und Motorenbau häufig auf, weshalb auch das belastungs- und zeitabhängige plastische Kriechverhalten bereits vom Konstrukteur berücksichtigt werden sollte. Die bleibende Dehnung nach einer Belastungsdauer von 10.000 Stunden unter Zugbeanspruchung (50 % R_m) beträgt 0,05 %, unter Druckbeanspruchung (50 % σ_{dB}) 1 bis 1,4 % [18].

Soll ein Konstruktionsteil von Anfang an formstabil und kriechfest sein, so kann durch entsprechende Sortenauswahl und Belastungsbeschränkung, bei höheren Belastungen durch zusätzliches „mechanisches Trainieren“, das heißt durch mehrmaliges Vorbelasten auf die Grenze der späteren Betriebsanstrengung (vermehrt um einen Sicherheitsbeitrag) erreicht werden [18]. Bereits bei der ersten Belastung wird der Hauptanteil der plastischen Verformung vorweggenommen, weitere Belastungen verlaufen dann nahezu elastisch. Während der ersten Belastungsphase ist der Kriechbetrag am größten, er nimmt mit jedem weiteren Belastungszyklus deutlich ab. Für die weitgehende Stabilisierung eines Bauteils sind etwa 5 bis 10 Vorbelastungen von 15 bis 20 Minuten Bela-

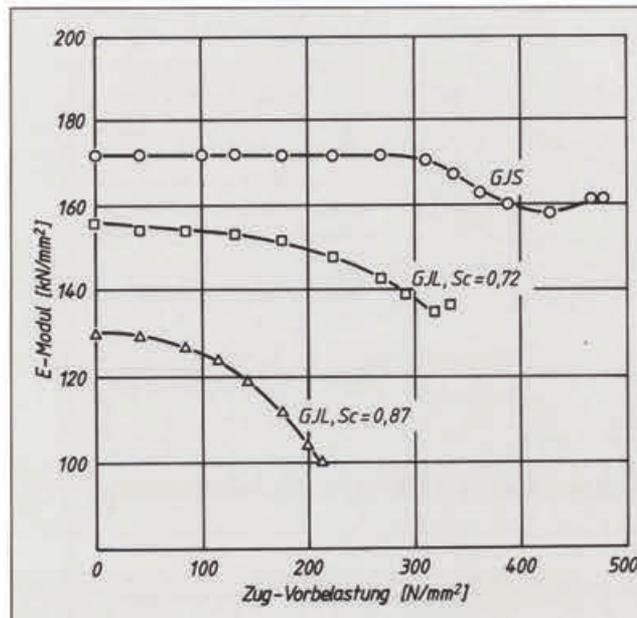


Bild 38: Je niedriger die Ausgangsfestigkeit des Gußeisens ist, desto niedriger ist auch die Vorbelastung, von der ab der Elastizitätsmodul abnimmt [23].

stungsdauer notwendig. Die maximale Belastungsgrenze, bis zu der optimales mechanisches Trainieren möglich ist, dürfte Dauerfestigkeitsgrenze des Werkstoffes sein. Darüber hinaus ist im Bereich der Zeitfestigkeit bis knapp unter die Bruchfestigkeit eine Vorwegnahme der plastischen Verformung nur beschränkt möglich, weil bei jedem weiteren Lastwechsel, auch nach einer Trainierbehandlung, mit einer – wenn auch nur geringen – plastischen Verformung zu rechnen ist [18].

Elastizitätsmodul im Ursprung (E_o -Modul)

Eine Besonderheit für Gußeisen mit Lamellengraphit ist der beanspruchungsabhängige Elastizitätsmodul [19 bis 21]. Denn Belastung und Verformung sind bereits bei niedrigen Lasten nicht (mehr) linear proportional, ein Elastizitätsmodul kann also nur als Tangente im Ursprung der Spannungs/Dehnungs-Kurve (E_o -Modul) oder – ersatzweise bei Meßproblemen im Bereich kleiner Lasten und geringer Verformungen – als Sekante (Sekantenmodul) zwischen dem Ursprung und einer möglichst niedrigen bleibenden Last bestimmt werden. Ursache hierfür sind einmal Spannungsänderungen und plastische Verformungen im Mikrobereich sowie das Entstehen von Hohlräumen in der Umgebung der im Gußeisen vorhandenen Graphitlamellen schon bei relativ niedrigen Lasten. Der E-Modul wird also mit zunehmender Zugspannung kleiner [22]. Daraus resultiert, daß der E-Modul von GJL anders als bei nicht graphithaltigen

metallischen Werkstoffen von der Festigkeit abhängig ist. Damit wird es möglich, innerhalb statistischer Grenzen Zugfestigkeit R_m und E_o -Modul ineinander umzurechnen [20]:

$$R_m = 1330 / (320 - E_o) - 418 \quad [\text{N/mm}^2]$$

(E_o in kN/mm²)

und den E-Modul aus dem Sättigungsgraphit indirekt abzuschätzen oder aus der Schallgeschwindigkeit zu bestimmen.

Belastet man GJL und mißt anschließend bei kleiner Belastung den adiabatischen E_o -Modul durch Eigenschwingungsversuche, so zeigt sich, daß im Bereich einer Druckbelastung kein Einfluß der Lasthöhe besteht, der im Zugbereich dagegen um so stärker abfällt (Bild 38), je niedriger die Ausgangsfestigkeit ist.



Bild 39: Steuergehäuse aus GJL-200 für eine Baumaschine, Gewicht: 128 kg

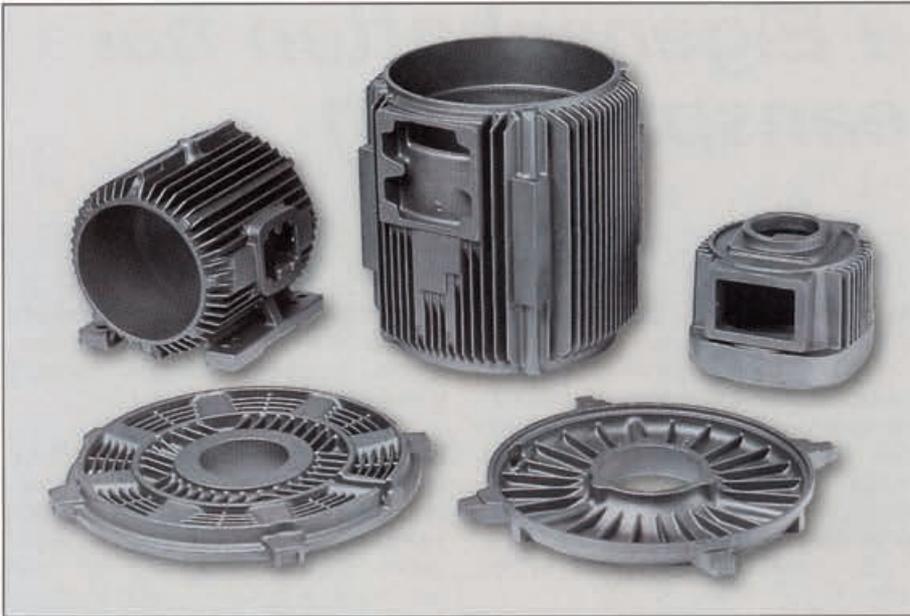


Bild 40: Dünnwandige Elektromotorenteile aus GJL-250 mit aufwendigen Kühlrippen

Die Tatsache, daß bei GJL höhere Festigkeit auch höheren E-Modul bedeutet, führt dazu, daß bei der Verwendung einer festeren Gußeisensorte für eine bestehende Konstruktion unter Umständen größere Gußspannungen auftreten. Dadurch kann der erwartete Zugewinn an Werkstückfestigkeit ganz oder teilweise aufgezehrt werden.

Wanddickenabhängigkeit der Eigenschaften

Ein häufiges Verständigungsproblem zwischen Hersteller und Anwender von Bauteilen aus Gußeisen mit Lamellengraphit ist die auch in den Normen zum Ausdruck kommende Abhängigkeit der

Eigenschaften von der Wanddicke: Dickwandige Werkstücke haben eine geringere Zugfestigkeit und Härte als aus derselben Schmelze hergestellte mit dünneren Wänden. Das gilt zwar auch für alle anderen metallischen Werkstoffe, ist aber bei GJL durch den Einfluß der Abkühlgeschwindigkeit auf die Graphitkristallisation wesentlich ausgeprägter. Verdeutlicht wird diese Wanddickenabhängigkeit auch durch die beiden Darstellungen in Bild 41.

Auch innerhalb eines Gußstückes besitzen dünnere Partien eine höhere Festigkeit und Härte als massivere, wenn dabei auch durch die gegenseitige Beeinflussung benachbarter Gußteilpartien die Wanddickenabhängigkeit der Eigenschaften gemildert wird.

Umgekehrt heißt das: Alle Gußteile, die aus demselben Eisen (aus derselben Pflanze) vergossen werden, gehören zur selben Werkstoffsorte, unabhängig von den im Gußstück anzutreffenden Eigenschaften. Dünnwandige Teile weisen eine höhere, dickwandige eine niedrigere Festigkeit auf als die jeweilige Nominalfestigkeit der betreffenden Sorte.

Die geometriebedingten Eigenschaftsunterschiede, die sich auch auf den E-Modul und die Bearbeitbarkeit auswirken, müssen bei der Konstruktion berücksichtigt werden. Sie lassen sich andererseits aber auch für die konstruktive Gestaltung von Gußteilen nutzen.

Ist die Wanddicke bei gegebener chemischer Zusammensetzung zu gering oder wird die Abkühlgeschwindigkeit durch zu schnell abkühlenden Formstoff oder durch Verwendung von Kühlkokillen zu stark erhöht, dann kann der Kohlenstoff während des Erstarrens der Schmelze nicht oder nicht mehr vollständig als Graphit auskristallisieren, sondern es bildet sich Eisencarbid (Fe_3C , Zementit).

Die Folge sind hohe Härte, Sprödigkeit, Spannungsempfindlichkeit sowie erschwerte Bearbeitbarkeit. Damit werden die mit einer bestimmten Werkstoffsorte realisierbaren Mindestwanddicken begrenzt.

Carbidhaltige Gefüge treten in Bereichen zu hoher Abkühlgeschwindigkeit auf, vor allem an außenliegenden Ecken und Kanten („Kantenhärte“); ihr Bruchgefüge ist weiß, daher der Name „Weißeinstrahlung“.

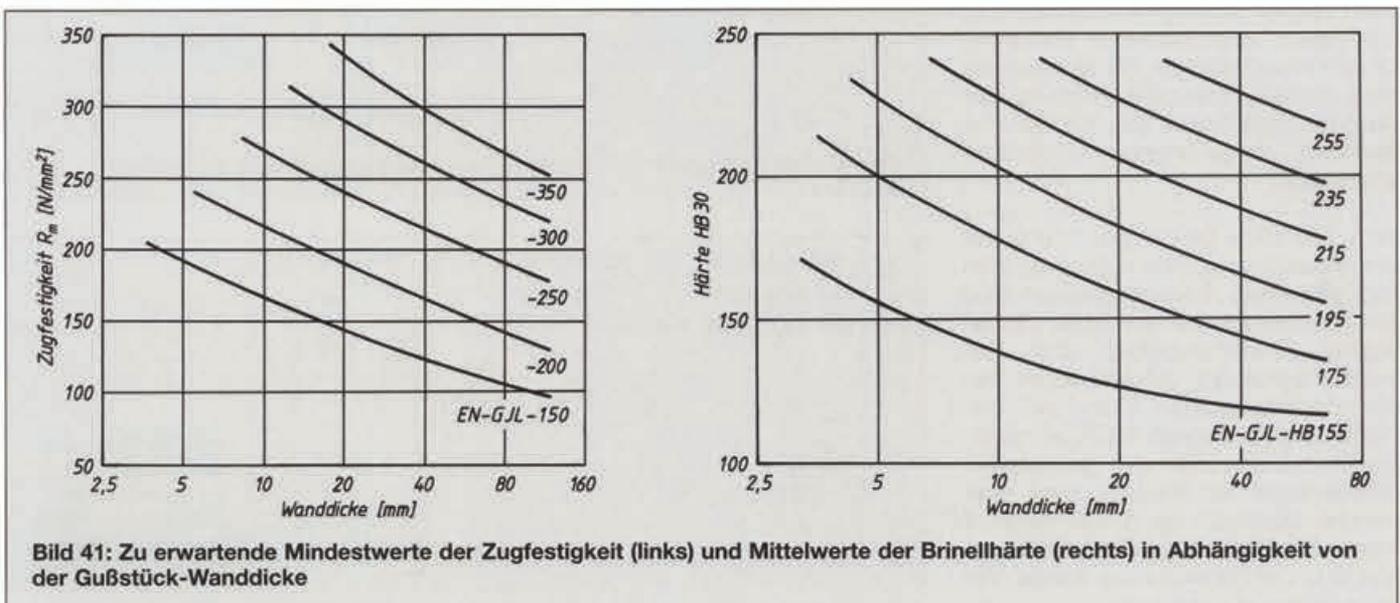


Bild 41: Zu erwartende Mindestwerte der Zugfestigkeit (links) und Mittelwerte der Brinellhärte (rechts) in Abhängigkeit von der Gußstück-Wanddicke

Mechanische Eigenschaften bei zyklischer Beanspruchung

In vielen Fällen werden Bauteile aus Gußeisen mit Lamellengraphit nicht nur rein statisch beansprucht. Daher können Ergebnisse von Druck- oder Zugversuchen nur dann als Berechnungsunterlagen vom Konstrukteur verwendet werden, wenn sicher ist, daß das Bauteil überwiegend statisch beansprucht wird, nur selten Laständerungen auftreten oder die Wechsellastspannungen recht niedrig sind. Es gibt aber auch Anwendungsfälle, bei denen stärkere Kräfte einwirken, die sich nach Größe und Richtung gleichmäßig oder ungleichmäßig ändern, und bei denen solche zyklischen Beanspruchungen unter zahlreichen Lastwechseln bei niedrigen Spannungen auftreten. Gußeisen mit Lamellengraphit ist solchen Belastungen durchaus gewachsen.

Als Folge der wechselnden Belastungen von Bauteilen können mit der Zeit Risse und Brüche bei Spannungen auftreten, die meist weit niedriger als die Zugfestigkeit des Bauteils sind. Ein durch wechselnde Beanspruchung entstandener Bruch wird bei zähen Werkstoffen als Dauerbruch bezeichnet, da hier mit jedem Lastwechsel ein bestimmter Rißfortschritt vor dem endgültigen Bruch beobachtet werden kann (Rasterlinien). Bei Gußeisen mit Lamellengraphit tritt meist bei Überschreiten der zulässigen Spannung ein spröder Gewaltbruch ein. Um diesen unter zyklischer Belastung zu vermeiden, sind für die Berechnung eines Bauteiles genaue Kenntnisse über die Schwingfestigkeit des für die Verwendung vorgesehenen Werkstoffs erforderlich.

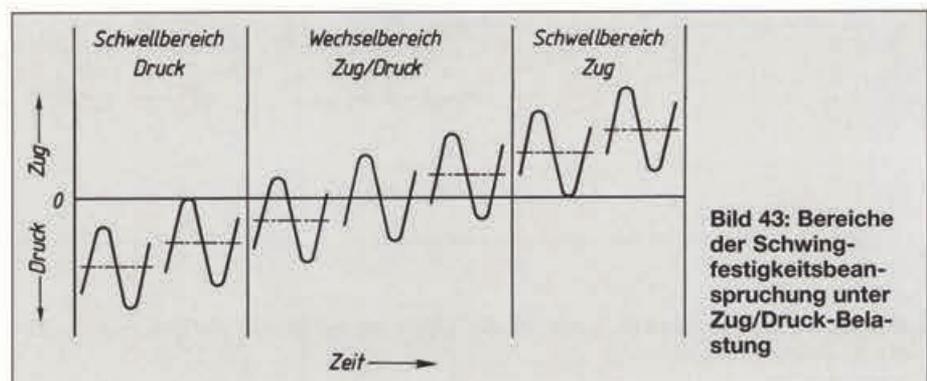
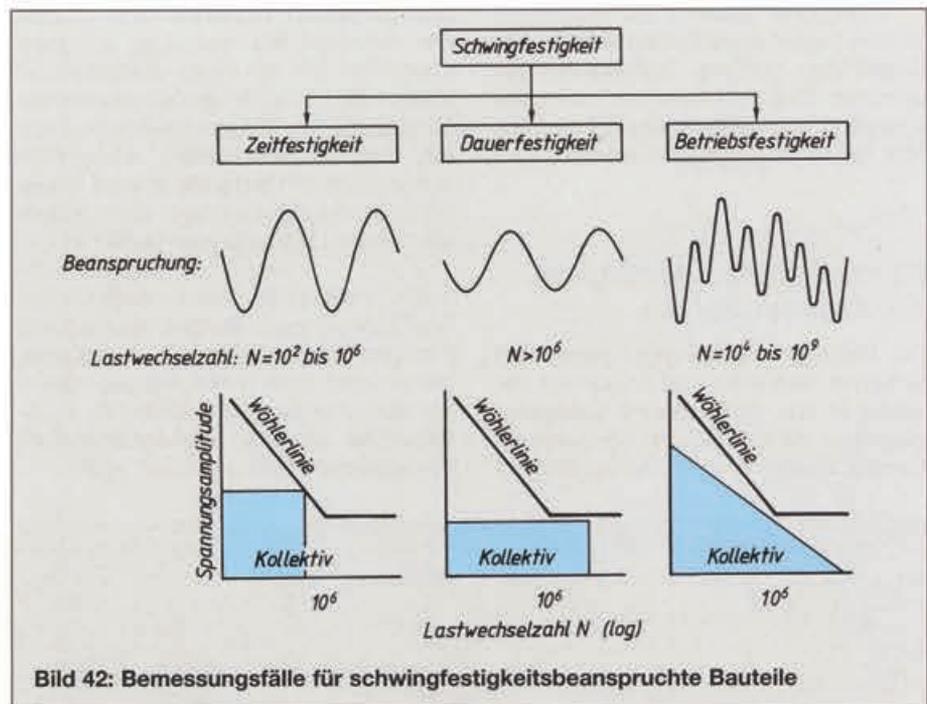
Nach Bild 42 ist bei der Bewertung von zyklischen Beanspruchungen zwischen den einzelnen Belastungsarten und den Lastwechselzahlen nach Zeitfestigkeit, Dauerfestigkeit und Betriebsfestigkeit zu unterscheiden. Bei den Belastungsarten Zeit- und Betriebsfestigkeit können die Spannungsamplituden je nach der geforderten Lebensdauer des Bauteils mehr oder weniger oberhalb der Dauerfestigkeit liegen. Für Gußeisen mit Lamellengraphit ist in der Regel nur der Bereich der Dauerfestigkeit interessant.

Dauerfest konstruierte Bauteile werden so ausgelegt, daß sie auch bei unendlich großer Lastwechselzahl nicht versagen. Die möglichen Beanspruchungsarten sind in Bild 43 dargestellt. Meist ist die Dauerfestigkeit im reinen Wechselbereich (Mittelspannung = 0) höher als im Schwellbereich, wobei die Mittelspannung entweder im Druck- oder im Zugbereich liegen kann.

Bei der Übertragung der Ergebnisse von Schwingfestigkeitsuntersuchungen auf ein Bauteil müssen Abschläge für den Wanddickeneinfluß (mögliche

Inhomogenitäten) und insbesondere für den Oberflächenzustand (Gußoberfläche, bearbeitet, poliert, Kerben) gemacht werden.

Der quantitative Einfluß der Gußhaut auf die Schwingfestigkeit eines Gußeisens mit Lamellengraphit ähnlich eines GJL-300 ist in Bild 44 wiedergegeben. Mit der Entfernung der Gußhaut durch eine riefenfreie Bearbeitung steigt die Schwingfestigkeit um bis zu 50 %. Im allgemeinen wird ein Abfall der Schwingfestigkeit von bearbeiteten Proben zu Proben mit Gußhaut von 15 bis 20 % angenommen. – Durch das in



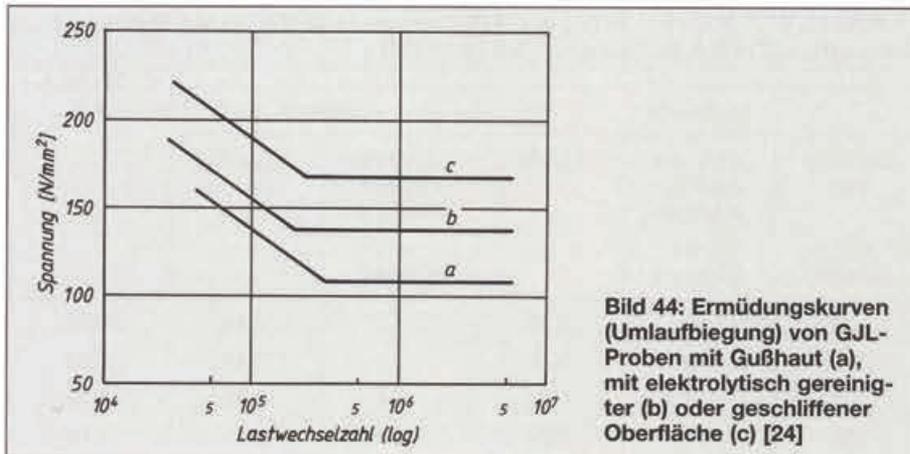


Bild 44: Ermüdungskurven (Umlaufbiegung) von GJL-Proben mit Gußhaut (a), mit elektrolytisch gereinigter Oberfläche (b) oder geschliffener Oberfläche (c) [24]

Tabelle 9: Wechselfestigkeit von Gußeisen mit Lamellengraphit [26]

	Werkstoffbezeichnung GJL-				
	150	200	250	300	350
	[N/mm ²]				
Biegewechselfestigkeit σ_{bW}	70	95	120	140	145
Zug/Druck-Wechselfestigkeit σ_{zdW}	40	50	60	75	85

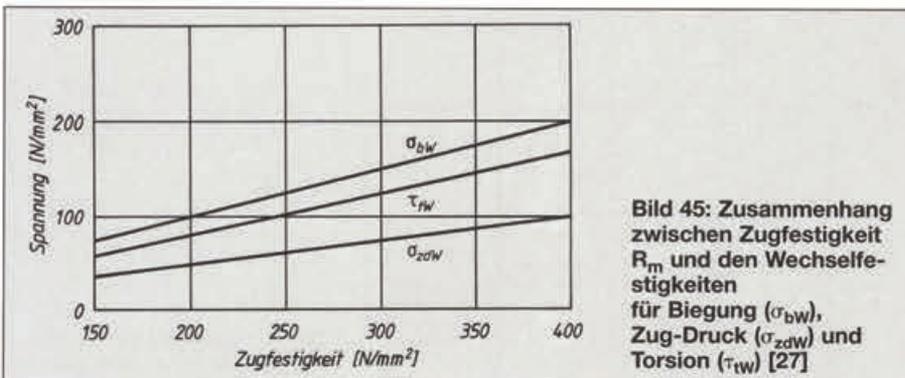


Bild 45: Zusammenhang zwischen Zugfestigkeit R_m und den Wechselfestigkeiten für Biegung (σ_{bW}), Zug-Druck (σ_{zdW}) und Torsion (τ_{TW}) [27]

Gießereien übliche Reinigungsstrahlen der Gußstückoberfläche durch neuzeitliche Strahlanlagen mit hoher Aufprallenergie des Strahlgutes werden die oberflächennahen Bereiche von Gußstücken aus Stahlguß und duktilem Gußeisen durch das Aufbauen von Druckspannungen verfestigt. Es ist davon auszugehen, daß der gleiche Effekt auch bei Gußeisen mit Lamellengraphit die Schwingfestigkeit von unbearbeiteten Bauteiloberflächen um mehr als 10 bis 15 % erhöht. Dies erklärt wahrscheinlich auch die in [25] mitgeteilten Ergebnisse, nach denen die Dauerfestigkeit von Proben mit Gußhaut höher ist als die von bearbeiteten Proben.

In Tabelle 9 sind Mindestwerte für die Biegewechselfestigkeit und die Zug/Druck-Wechselfestigkeit den genormten Sorten von Gußeisen mit Lamellengraphit zugeordnet. Die in dieser Tabelle nicht enthaltene Torsionswechselfestigkeit liegt zwischen den Werten für Biegung und Zug, wie aus Bild 45 abzulesen ist. Die Ergebnisse sind an polierten Rundstäben mit einem Durchmesser von 7,5 bis 20 mm ermittelt worden. Aus diesen und weiteren Untersuchungen zur Dauerfestigkeit für Gußeisen mit Lamellengraphit können diese Beziehungen zwischen Dauerfestigkeit und Zugfestigkeit R_m aufgestellt werden:

Zug/Druck-Wechselfestigkeit = $0,26$ bis $0,35 \times R_m$
 Torsions-Wechselfestigkeit = $0,43 \times R_m$
 Biegewechselfestigkeit = $0,35$ bis $0,5 \times R_m$

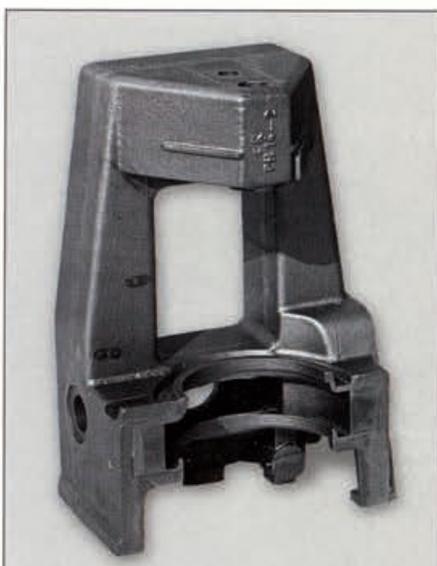


Bild 46: Druckrollenbock aus GJL-300 für eine Tabletensortiermaschine, Gewicht: 135 kg

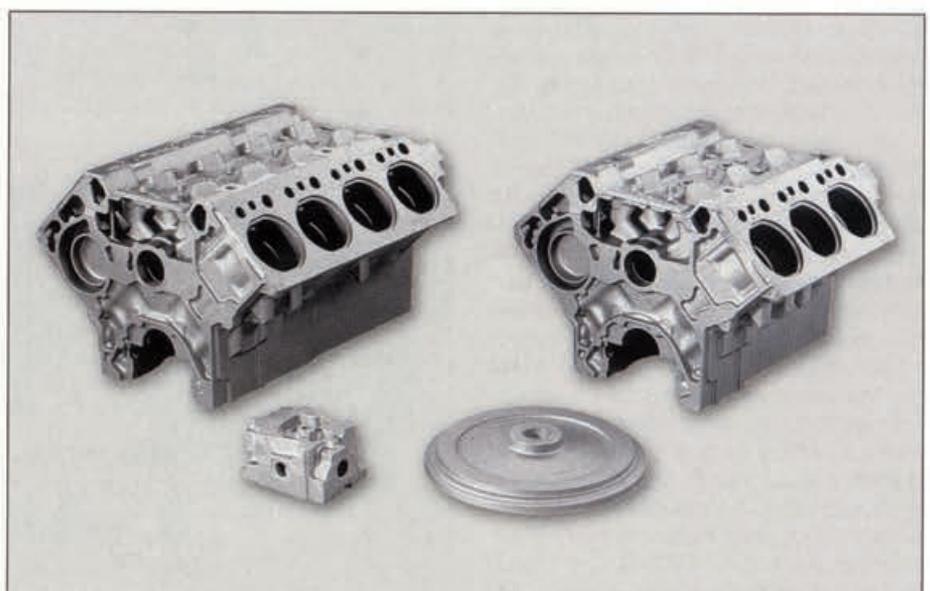


Bild 47: Zylinderkurbelgehäuse aus GJL-250 (niedriglegiert) mit Stückgewichten bis 318 kg mit zugehörigem Zylinderkopf und Schwungscheibe

Auch neuere Untersuchungen [28, 29] bestätigen diese Zusammenhänge.

Für die Umlauf-Biegewechselbeanspruchung liegt das Dauerfestigkeitsverhältnis für ungekerbte Proben bei 0,58, für Proben mit Rundkerb bei 0,40 und für Proben mit Spitzkerb bei 0,35 [29]. Natürlich ist auch immer dann mit einer Minderung zu rechnen, wenn ein Korrosionsangriff vor oder während des Einsatzes erfolgt oder eine Schädigung durch Zerrüttung des Gefüges als Folge einer Überbeanspruchung zu verzeichnen ist.

Kerbempfindlichkeit

Im Gegensatz zu den meisten Eisen-Kohlenstoff-Werkstoffen besitzt Gußeisen mit Lamellengraphit nur eine geringe Kerbempfindlichkeit. Die in der metallischen Grundmasse eingelagerten zahlreichen Graphitlamellen üben von sich schon eine gewisse Kerbwirkung aus, so daß zusätzlich eingebrachte äußere Kerben kaum noch einen weiteren negativen Einfluß ausüben können. Nach *Tabelle 10* steigt die Kerbempfindlichkeit von Faktor 1,0 bei GJL-150 auf Faktor 1,26 bei GJL-300.

Einfluß einer Oberflächenbehandlung auf die Schwingfestigkeit

Ebenso wie bei anderen Werkstoffen können auch bei Gußeisen mit Lamellengraphit sowohl die statischen als auch die zyklischen Festigkeitseigenschaften durch eine nachträgliche Oberflächenbehandlung erheblich erhöht werden. Voraussetzung hierfür ist, daß eine Verfestigung der oberflächennahen Bereiche durchgeführt wird. Dies kann entweder thermisch (Randschichthärten), chemisch (Nitrieren, Ionitrieren) oder mechanisch (Festwalzen, Strahlen) erfolgen. In allen Fällen werden Druckeigenspannungen in den oberflächennahen Bereichen der Bauteile aufgebaut. Die Höhe der aufgetragenen Druckspannungen bestimmt die Verbesserung der Schwingfestigkeit gegenüber unbehandelten Bauteilen. In Abhängigkeit von der aufgetragenen Spannung wird von einer Erhöhung der Schwingfestigkeit von 20 bis 160 % berichtet, wie *Bild 48* ein Beispiel zeigt. Der Einfluß der Oberflächenbehandlung ist im Bereich der Zeitfestigkeit wesentlich stärker ausgeprägt als bei der Dauerfestigkeit.

Tabelle 10: Einfluß einer Kerbung auf die Dauerschwingfestigkeit von Gußeisen mit Lamellengraphit unterschiedlicher Festigkeit [30]

Ungekerbt			Gekerbt		K ^{*)}
Zugfestigkeit R _m [N/mm ²]	Zug/Druck-Wechsel-festigkeit σ _{zdW} [N/mm ²]	σ _{zdW} /R _m	Zug-Druck-Wechsel-festigkeit σ _{zdW} [N/mm ²]	σ _{zdW} /R _m	
138	63	0,46	63	0,46	1,00
172	82	0,48	79	0,46	1,04
205	103	0,50	94	0,46	1,10
232	122	0,52	106	0,45	1,15
252	134	0,53	112	0,44	1,20
294	161	0,55	128	0,45	1,26

^{*)} K = Kerbempfindlichkeit, Verhältnis σ_{ungekerbt}/σ_{gekerbt}

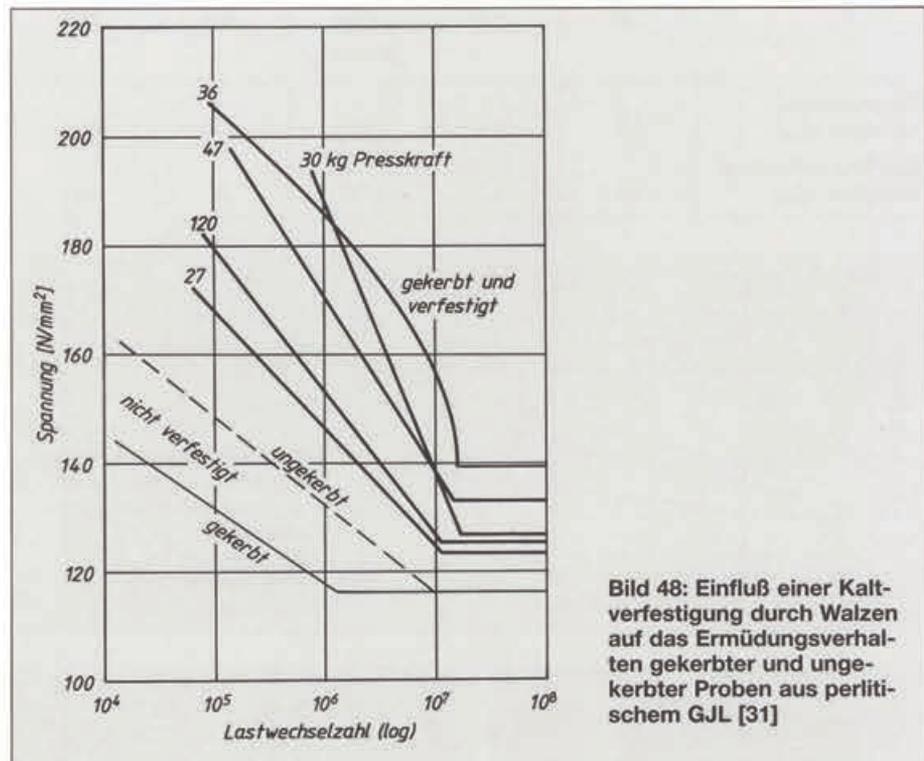


Bild 48: Einfluß einer Kaltverfestigung durch Walzen auf das Ermüdungsverhalten gekerbter und ungekerbter Proben aus perlitischem GJL [31]

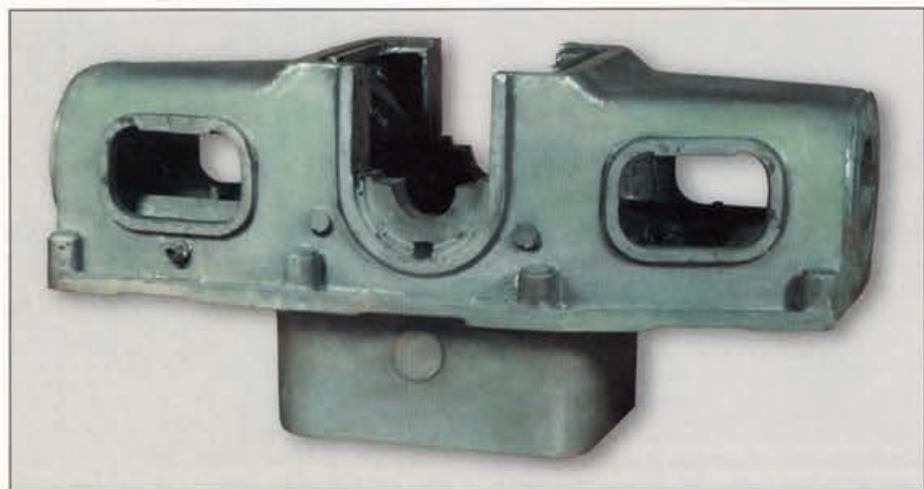


Bild 49: Gehäuse für einen Kolbenverdichter; Werkstoff: GJL-200, Gewicht: 2,8 t

Dämpfungsfähigkeit

Für zahlreiche Anwendungsfälle ist die große Dämpfungsfähigkeit von Gußeisen mit Lamellengraphit von erheblicher oder sogar entscheidender Bedeutung für dessen Anwendung. Die Dämpfungsfähigkeit ist die Eigenschaft, die es einem Werkstoff ermöglicht, von außen aufgebrachte Schwingungen zu absorbieren. Bei jedem Schwingungszyklus wird ein Teil der Energie im Innern des Materials durch eine Art von innerer Reibung absorbiert und in Wärme umgewandelt. Hinzu kommt, daß es nur bei Gußkonstruktionen möglich ist, mit geringem Aufwand schwingungstechnisch günstigste Formen zu verwirklichen.

Die Dämpfung ist im allgemeinen stark von der Spannungsamplitude der schwingungserzeugenden Wechsellastspannung und von der Lastwechselzahl abhängig (Bild 50). Während mit größerer Spannungsamplitude die Dämpfungsfähigkeit ebenfalls zunimmt, haben die Frequenz und die Temperatur nur einen geringen Einfluß.

Bei Stahl steigt die Dämpfung erst bei verhältnismäßig hoher Spannungsamplitude auf größere Werte an, wenn makroskopische plastische Verformungen des Werkstoffes eintreten, in einem Bereich also, der technisch nicht mehr von Bedeutung ist. Gußeisen mit Lamellengraphit besitzt dagegen bereits bei kleinen Spannungsamplituden in diesem technisch außerordentlich wichtigen Bereich eine hohe Dämpfung.

Die Dämpfungsfähigkeit wird in erster Linie durch die Menge und die Ausbildungsform des Graphits bestimmt. Sie ist um so größer, je mehr Graphit vorhanden ist und je größer die Graphitlamellen sind. Die Dämpfung ist eine Folge der inneren Reibung in den Graphitlamellen [33] und deren Kerbwirkung. Die am Graphit auftretenden Spannungsspitzen verursachen innerhalb mikroskopischer Gefügebereiche elastisch-plastische Verformungen der Grundmasse, was zu einem raschen Abbau der Schwingungsenergie führt. Es ist daher verständlich, daß mit abnehmendem Graphitanteil die Dämpfungsfähigkeit geringer wird. Außer-

dem ist sie bei ferritischem etwas höher als bei perlitischem Grundgefüge, weil die plastische Verformbarkeit des Ferrits größer ist als die des Perlits.

Als Einheit für die Dämpfungsfähigkeit eines Materials benutzt man die auf die Ausgangsenergie bezogene Menge an Energie, die während jeder Schwingung absorbiert wird, sie ist umgekehrt proportional dem Elastizitätsmodul. Nach Bild 55 verhalten sich die Abklingzeiten einer freien Schwingung bei Gußeisen mit Lamellengraphit, Gußeisen mit Kugelgraphit und Stahl wie 1:1,8:4,3. Ähnliche Verhältnisse ergeben sich aus den Angaben in Tabelle 11, die ferner verdeutlichen, daß das Dämpfungsvermögen mit der Spannungsamplitude zunimmt; auch ein ferritisches Gefüge beeinflusst dies günstig.

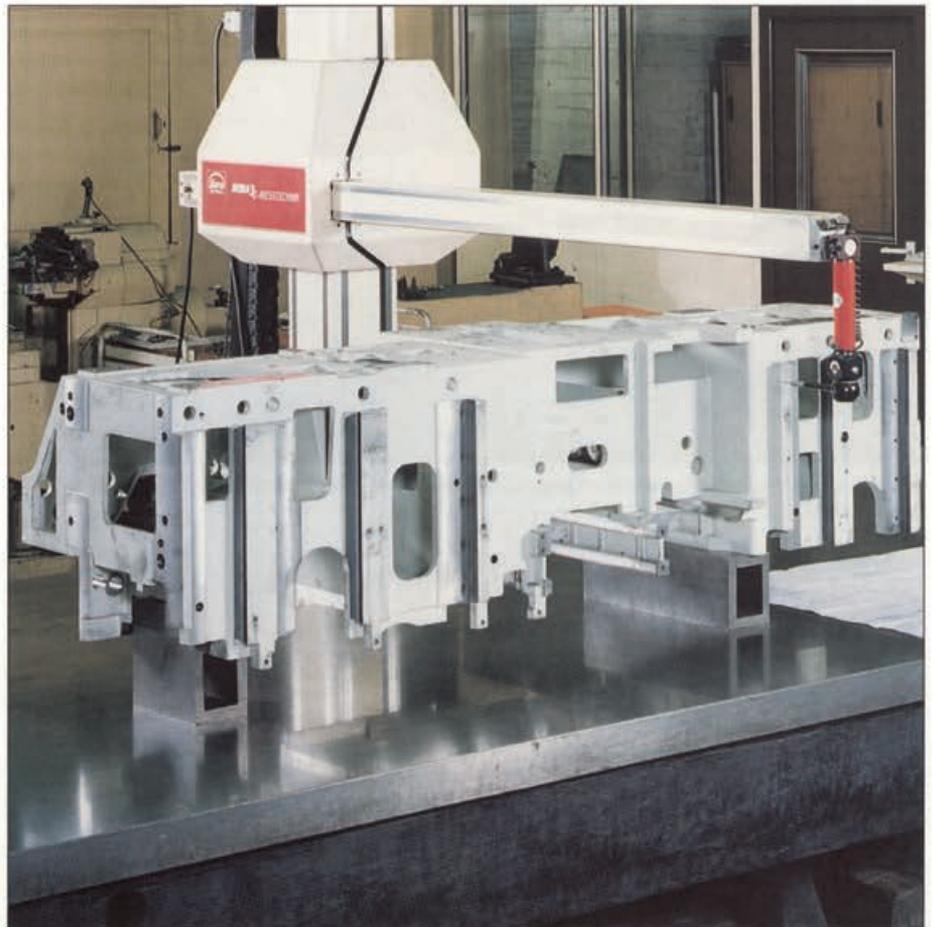
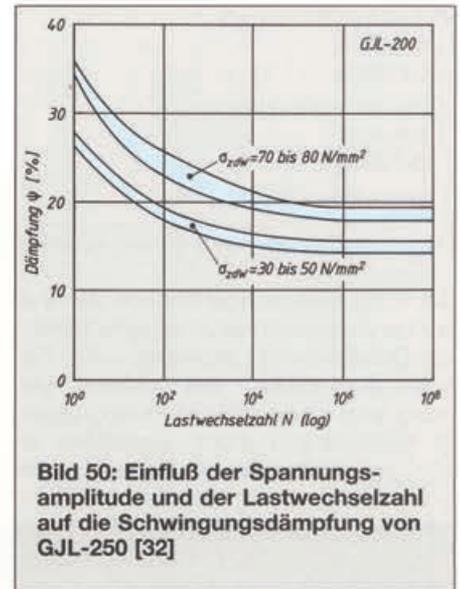


Bild 51: Vermessen des fertigbearbeiteten Ständers für eine Holzbearbeitungsmaschine; Werkstoff: G.JL-200, Abmessungen: 2140 × 705 × 650 mm, Gewicht: 598 kg

Tabelle 11: Spezifisches Schwingungs-Dämpfungsvermögen einiger Eisengußwerkstoffe, Anhaltswerte [36]

Werkstoff	Spezifisches Dämpfungsvermögen in %*) bei einer Biegespannung von	
	105 N/mm ²	211 N/mm ²
Gußeisen mit Lamellengraphit, perlitisch	4,4 bis 5,8	5,9 bis 7,2
Schwarzer Temperguß		
ferritisch	4,2	6,3
perlitisch	3,3	4,55
Gußeisen mit Kugelgraphit		
ferritisch	2,5	3,3
perlitisch	2,2	2,95
Unlegierter Stahlguß	1,45	1,9

*) Prozentuales Verhältnis der je Schwingung absorbierten Energie zur Gesamtenergie

Die hohe Dämpfungsfähigkeit ist eine der hervorstechendsten Eigenschaften von Gußeisen mit Lamellengraphit. Für Anwendungsfälle, bei denen die Dämpfung gegenüber Schwingungen im Vordergrund steht, empfiehlt es sich, graphitreiche Gußeisensorten

geringerer Festigkeit zu verwenden. Die Freizügigkeit der Gestaltgebung von Gußstücken bietet genügend Möglichkeiten, niedrige Werkstofffestigkeit durch geeignete Profilwahl und somit zum Beispiel durch höhere Widerstandsmomente auszugleichen.



Bild 52: Meßplatte aus GJL-250 mit Lochraster, Abmessungen: 7000 × 2250 × 300 mm, Gewicht: 10,3 t

Auch erlaubt das Gießen, mit geringem Aufwand schwingungstechnisch günstige geometrische Formen zu verwirklichen.

Eine hohe Dämpfungsfähigkeit ist insbesondere in beweglichen Teilen und Konstruktionen vorteilhaft, bei denen ungedämpfte Schwingungen zu so hohen Spannungen führen können, die teilweise noch über denen von direkt aufgetragenen Kräften liegen und besonders beim Auftreten von Resonanzen zum Bruch der Bauteile führen.



Bild 53: Untergestell für eine Karusselldrehmaschine; Werkstoff: GJL-200, 5800 mm Ø, Gewicht: 44 t

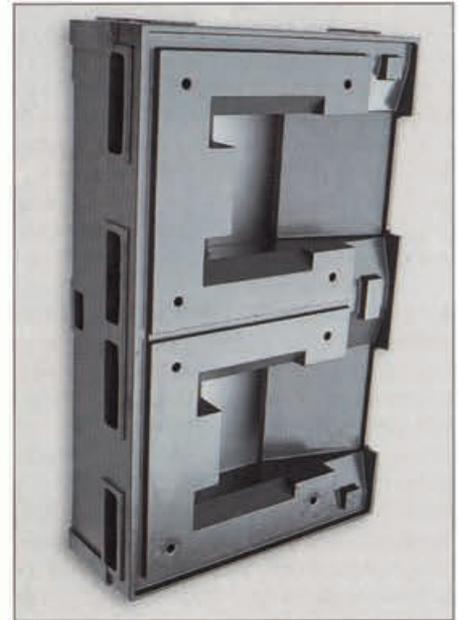
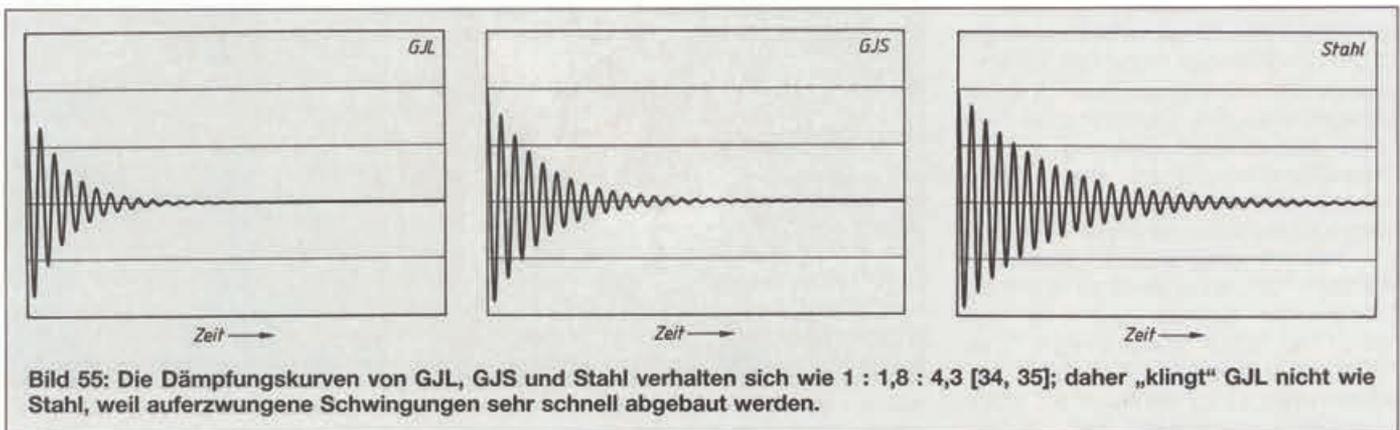


Bild 54: Ständer aus GJL-250 für zweispindeligen Drehautomaten, Gewicht: 3,0 t



Eigenschaften bei erhöhten Temperaturen

Für das Verhalten von Gußeisen mit Lamellengraphit bei erhöhten Temperaturen sind im wesentlichen vier Punkte maßgebend:

- mechanische Eigenschaften, insbesondere Warmfestigkeit,
- Beständigkeit gegen Verzunderung,
- Beständigkeit gegen Wachsen und Veränderung des Gefüges und damit der Eigenschaften,
- Temperaturwechselbeständigkeit.

Das in der Regel ganz oder überwiegend perlitische Grundgefüge beginnt sich bei Temperaturen oberhalb von etwa 400 °C zu Ferrit umzuwandeln, so daß Festigkeit und Härte geringer werden und es zusätzlich zu einer Volumenzunahme, das heißt zu einer Maßänderung („Wachsen“) kommt. Alle Zeitstandwerte müssen unter diesem Vorbehalt gesehen werden. Un- und niedriglegierte Gußeisen mit Lamellengraphit sind daher für langzeitigen Einsatz bei Temperaturen über 350 bis 450 °C nur eingeschränkt geeignet.

Verzundern

Das Verzundern beruht auf der Reaktion des Eisens und der Begleitelemente mit dem Luftsauerstoff oder oxidierenden Gasen und führt zur Bildung einer Schicht aus Oxidationsprodukten des Eisens, des Siliciums und der Begleit- und Legierungselemente. Es werden zunächst Silicium und Eisen und dann erst der Graphit oxidiert. Diese Zunderschicht ist, außer bei erhöhten Siliciumgehalten, nicht dicht und festhaftend genug, um den weiteren Oxidationsangriff zu verhindern.

Das Verzundern geht, wie *Bild 56* zeigt, zunächst rasch, dann langsamer aber stetig weiter. Eine leichte Oxidschicht bildet sich bereits bei 250 °C, ist jedoch bis zu Temperaturen von etwa 400 °C so unbedeutend, daß sie praktisch vernachlässigt werden kann. Mit höheren Temperaturen bis etwa 500 °C nimmt die Verzunderung zu, ist aber

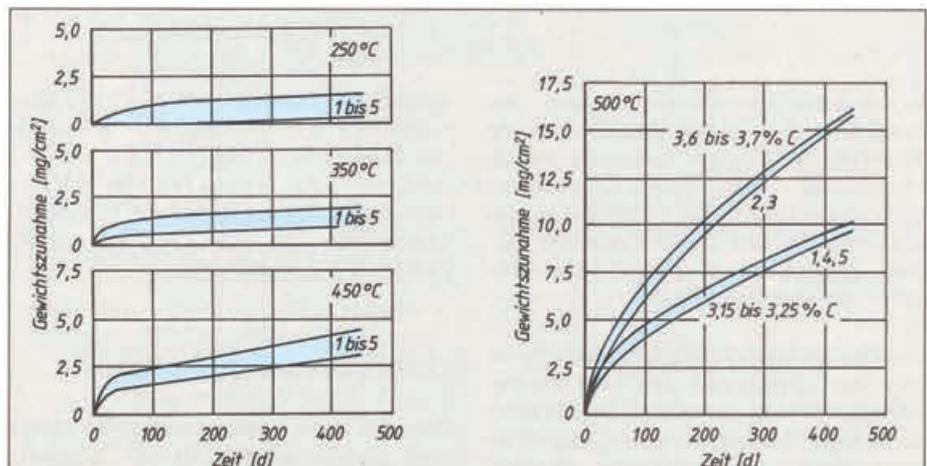


Bild 56: Einfluß der Temperatur und des Kohlenstoffgehalts auf die Verzunderung von unlegiertem Gußeisen mit Lamellengraphit [37], chemische Zusammensetzung siehe Tabelle 12; Gewichtszunahme = Summe von innerer und äußerer Oxidation

noch immer relativ gering. Bei noch höheren Temperaturen verläuft der Angriff so rasch, daß bei längeren Einsatzzeiten mit einer erheblichen Werkstoffschädigung zu rechnen ist [38].

Die in *Bild 56* angegebene Gewichtszunahme ist die Summe aus der Oberflächenoxidation und der inneren Oxidation entlang der Graphitlamellen. Hierbei ist die innere Oxidation, obwohl sie nur einen geringen Beitrag zur Gewichtszunahme liefert, wesent-

Tabelle 12: Chemische Zusammensetzung der untersuchten Werkstoffe [37]

Bez.	[Masse-%]		
	C	Si	Mn
1	3,25	1,58	0,65
2	3,69	1,55	0,73
3	3,61	1,63	0,76
4	3,15	1,59	0,43
5	3,17	1,61	0,62

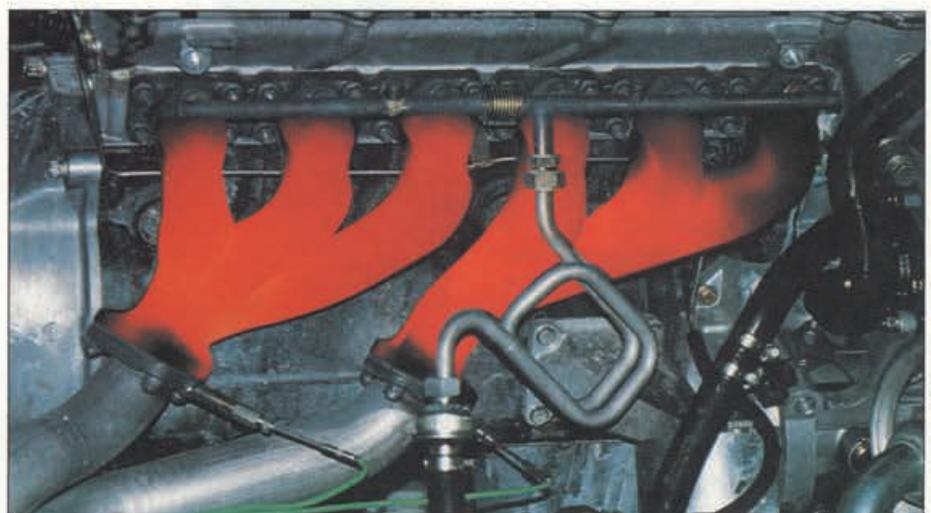
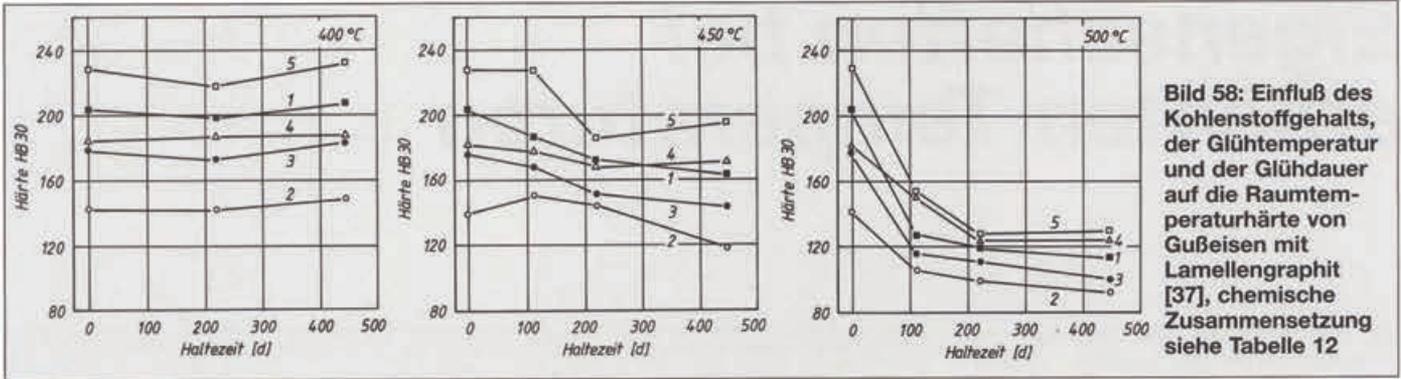


Bild 57: Abgaskrümmer aus Gußeisen mit Lamellengraphit bei der Erprobung



lich schädlicher, da sie entlang der Graphitlamellen in das Werkstoffinnere eindringt, das Gefüge schwächt und es infolge der voluminösen Oxidationsprodukte aufbläht. Die Oxidsäume, die sich entlang der Graphitlamellen bilden, dringen rasch einige Millimeter tief in die Randschicht ein.

Die Verzunderung hängt in erster Linie von der Temperatur ab. Eine zweite Einflußgröße ist unterhalb von 500 °C die Menge, Art und Verteilung des Graphits. Mehr und größerer Graphit erhöhen vor allem die innere Oxidation, D-Graphit verringert sie. Der Einfluß des Siliciumgehalts im üblichen Bereich ist nur gering, ein etwas höherer Gehalt hat eher ungünstige Auswirkungen auf die innere Oxidation, erst 3 bis 4 % Si verbessern die Zunderbeständigkeit. Legieren mit Chrom, Kupfer, Nickel oder Molybdän verlangsamt die Verzunderung oberhalb von 500 °C, bei tieferen Temperaturen ist die Wirkung aber nur wenig ausgeprägt. In Dampf wurden ähnliche Ergebnisse wie an Luft erhalten [37].

Die Haftfestigkeit der Zunderschicht ist bei Gußeisen mit Lamellengraphit besser als bei Stählen, sie wird mit steigendem Kohlenstoffgehalt besser [39]. Dadurch wird der Werkstoff vor weiterer Oxidation geschützt, wenn nicht einer der Reaktionspartner durch diese Deckschicht diffundiert. Ist die Zunderschicht entsprechend dick, kommt die Diffusion und damit der Oxidationsvorgang zum Stillstand.

Durch Legierungselemente kann die Zunderbeständigkeit verbessert werden, wie bereits schon geringe Chromgehalte bis 1,25 %. Siliciumgehalte von 4 bis 8 % ergeben einen bis 900 °C zunder- und wachstumsbeständigen Werkstoff. Dabei ist zu beachten, daß die Kohlenstoff- und Siliciumgehalte so aufeinander abgestimmt sein müssen, damit ein ferritisches Gefüge mit feinen Graphitlamellen entsteht, das heißt also eine übereutektische Zusammen-

setzung vermieden wird. Geringe Aluminiumgehalte verbessern ebenfalls die Zunderbeständigkeit [40]. Besonders die Sorten mit 4 bis 7 % Al werden als zunderbeständiger Werkstoff verwendet, die Einsatztemperaturen betragen bis zu 900 °C.

Gefügeveränderungen

Perlit ist thermodynamisch nicht stabil und zerfällt allmählich bei höheren Temperaturen zu Ferrit und Graphit. Der Perlitzerfall von unlegiertem Gußeisen mit Lamellengraphit kann bei sehr langen Einsatzzeiten bereits bei 400 °C beginnen und wird zwischen 450 und 500 °C merklich. Dadurch kommt es zu einem Verlust an Festigkeit und Härte. Bild 58 zeigt, daß unlegierte Sorten ab 450 °C ihre Raumtemperaturhärte verlieren. Durch Legieren mit Chrom kann der Härteabfall bis



Bild 59: Teil der Abgasanlage eines Großdieselmotors; Werkstoff: niedrig CrMolegiertes GJL, Gewicht: 37 kg



Bild 60: Schlackenkübel für ein Hüttenwerk; Werkstoff: ferritisches GJL, Gewicht: 32,4 t

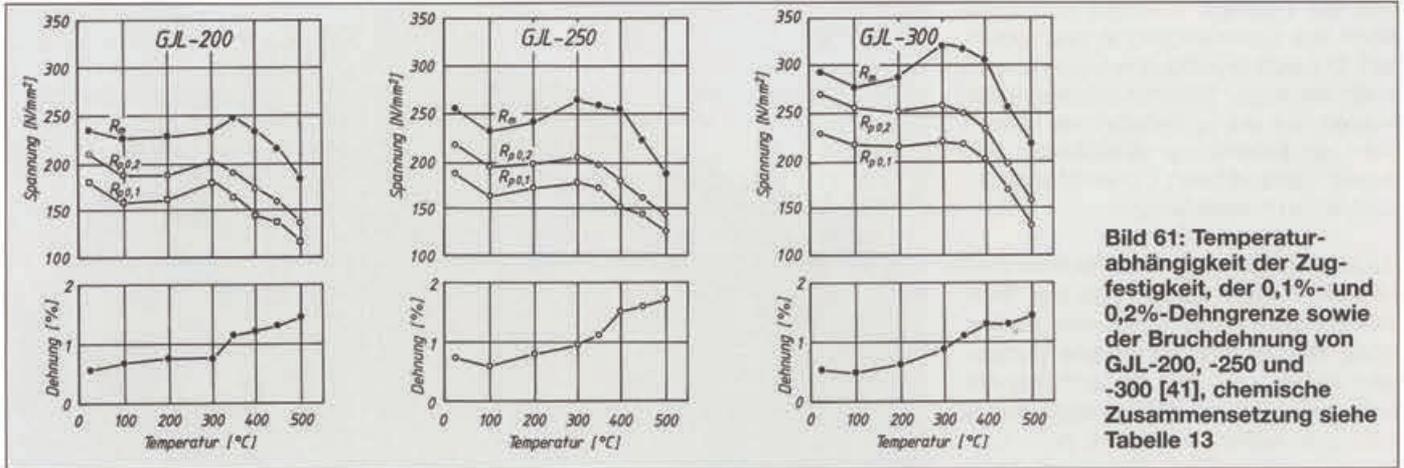


Bild 61: Temperaturabhängigkeit der Zugfestigkeit, der 0,1%- und 0,2%-Dehngrenze sowie der Bruchdehnung von GJL-200, -250 und -300 [41], chemische Zusammensetzung siehe Tabelle 13

Tabelle 13: Chemische Zusammensetzung der untersuchten Werkstoffe [41]

Werkstoffsorte	[Masse-%]							R _m [N/mm ²]	HB 30
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni		
GJL-200	3,26	2,24	0,56	0,49	0,108	-	-	232	215
GJL-250	3,32	1,81	0,71	0,25	0,085	-	-	261	206
GJL-300	3,19	1,85	0,41	0,12	0,092	0,33	1,31	309	228

450 °C verhindert, bei höheren Temperaturen verzögert werden. Oberhalb 550 °C werden alle Sorten mehr oder weniger vollständig ferritisiert. Als Folge der Graphitausscheidungen fängt das Gußeisen dabei an zu wachsen. Der Verlust an Festigkeit ist nicht besonders ausgeprägt, da geringe Ferritanteile die Zugfestigkeit weit weniger beeinflussen als die Härte [37].

Warmfestigkeit

Die Zugfestigkeit von Gußeisen mit Lamellengraphit bleibt bis etwa 400 °C

praktisch unverändert, wie Bild 61 für GJL-200 bis -300 zeigt. Durch Legieren mit Chrom, Molybdän und/oder Nickel wird das Festigkeitsniveau angehoben, aber der Abfall kaum zu höheren Temperaturen verschoben [37].

Beim Zeitstandverhalten ist zu beachten, daß das Gefüge oberhalb einer bestimmten Temperatur durch den Perlitzerfall an Festigkeit verliert, so daß exakt gültige Werte eigentlich nur bis 350 °C gemessen werden können. Bild 62 enthält entsprechende Angaben für die gleiche Gußeisensorte wie in Bild 61. Die Zeitstandwerte für höhe-

re Temperaturen, wie in Bild 63 angegeben, können nur als Anhaltswerte betrachtet werden und dürfen nicht als Grundlage einer konstruktiven Bemessung von Bauteilen dienen.

Der Elastizitätsmodul nimmt, im Gegensatz zur Zugfestigkeit, mit steigender Temperatur zunächst fast linear ab, wobei aber im Schrifttum die Abfallrate sehr unterschiedlich angegeben wird [43]. Bild 65 zeigt Beispiele. Ein feinkörniges Gefüge in dünneren Querschnitten scheint nach [45] noch empfindlicher zu sein. Hinzu kommt der Einfluß der Spannungsabhängigkeit des E-Moduls, der bei höherer Temperatur stärker werden dürfte [43].

Temperaturwechselverhalten

Wo Verformungen durch Temperaturgradienten unvermeidlich sind, erweist

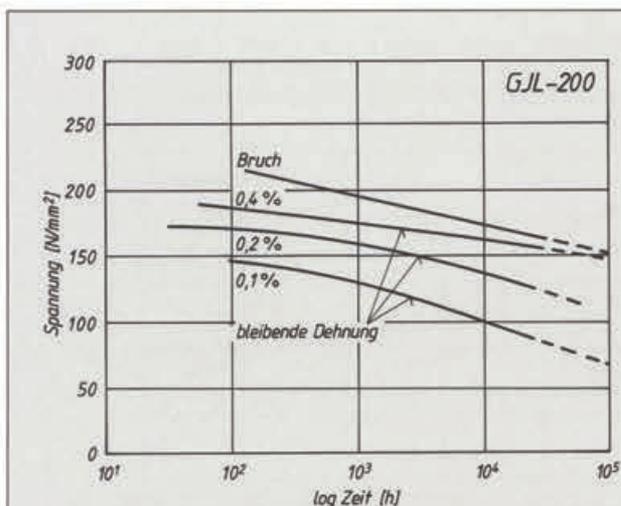


Bild 62: Zeitstandverhalten von GJL-200 (unlegiert) bei 350 °C [42]

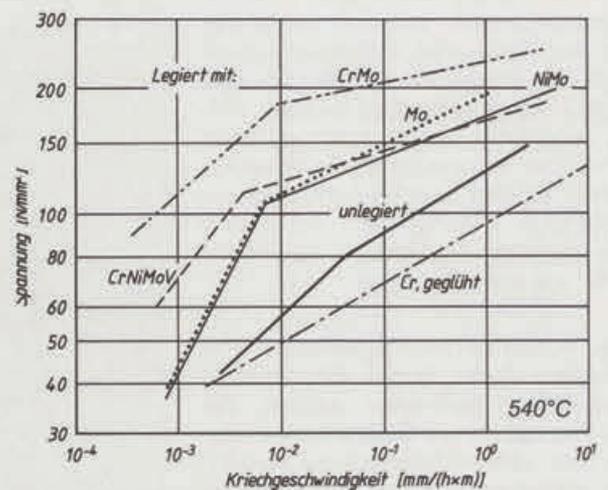


Bild 63: Einfluß der Zugspannung auf die Kriechgeschwindigkeit verschiedener, unterschiedlich niedriglegierter Sorten Gußeisen mit Lamellengraphit bei 540 °C [44]

sich der niedrige E-Modul von Gußeisen mit Lamellengraphit als vorteilhaft: Die sich ergebenden Spannungen sind niedrig, Verbindungselemente werden nur wenig belastet, es kommt nicht so schnell zur Ausbildung von Rissen (Brandrissen, Thermoschockrissen) und Verwerfungen.

Die Beanspruchung durch Temperaturwechsel beruht darauf, daß bei Temperaturänderungen nicht alle Stellen eines Werkstücks die gleiche Temperatur haben und sich dadurch gegenseitig verspannen, zum Beispiel kalter Kern und heiße Oberfläche beim Aufheizen und heißer Kern und kalte Oberfläche beim Abkühlen. Das Ausdehnen des heißen Bereichs wird durch den kalten behindert, so daß im heißen Bereich Druckspannungen entstehen, die durch Kriechen zumindest teilweise abgebaut werden. Beim Abkühlen ist der ursprünglich heiße Teilbereich dann zu klein und kommt unter Zugspannungen. Die Thermoschock- oder Brandrisse entstehen also typischerweise in der Abkühlphase bei Temperaturen unter etwa 300 °C, wo ein Kriechen kaum mehr möglich ist. Die Höhe der Spannungen ist dem thermischen Ausdehnungskoeffizienten, der Temperaturdifferenz und dem E-Modul proportional.



Bild 64: Kokille für einen Schmiedeblock; Werkstoff: ferritisches GJL, Gewicht: 127 t

Die Bedingungen werden natürlich mit steigender Maximaltemperatur schärfer, da das Kriechen bei höherer Temperatur rascher vonstatten geht und meist auch die Temperaturdifferenzen größer werden [45, 46]. Bild 66 zeigt den Einfluß der Spitztemperatur auf die Brandrissigkeit verschiedener Gußeisensorten mit Lamellengraphit. Eine weitere wichtige Einflußgröße ist die Geschwindigkeit, mit der aufgeheizt und abgekühlt wird. Schließlich spielt auch die Frage eine Rolle, ob das Bauteil fest eingespannt ist oder sich frei ausdehnen und zusammenziehen kann. Die Temperaturwechselbeständigkeit ist also eine typische systemabhängige Kenngröße und keine grundlegende Eigenschaft des Werkstoffs wie etwa die Härte.

Das Temperaturwechselverhalten von Bauteilen kann durch konstruktive Maßnahmen verbessert werden, die das Ziel haben, die Spitztemperaturen des Temperaturzyklus zu senken, die Vorspannung und Einspannung des Teils zu verringern sowie die Aufheiz- und Abkühlgeschwindigkeit zu senken. Werkstoffseitige Möglichkeiten sind

Bez.	Chemische Zusammensetzung [Masse-%]									R _m [N/mm ²]
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo	
A	3,16	0,99	0,78	0,28	0,097	-	0,09	-	0,02	240
B	3,09	0,55	1,09	0,18	0,103	-	-	-	-	280
C ¹⁾	3,30	1,18	1,56	0,35	0,069	-	0,05	-	0,02	295
D ²⁾	2,97	2,08	0,86	0,14	0,139	0,15	0,92	0,13	0,02	320
E ²⁾	3,23	1,30	0,81	0,16	0,114	-	1,43	-	0,44	325
F	2,93	1,11	0,70	0,073	0,112	0,01	0,05	1,25	0,42	360

¹⁾ 8 h/350 °C spannungsarm gegläht ²⁾ 2 h/500 °C spannungsarm gegläht

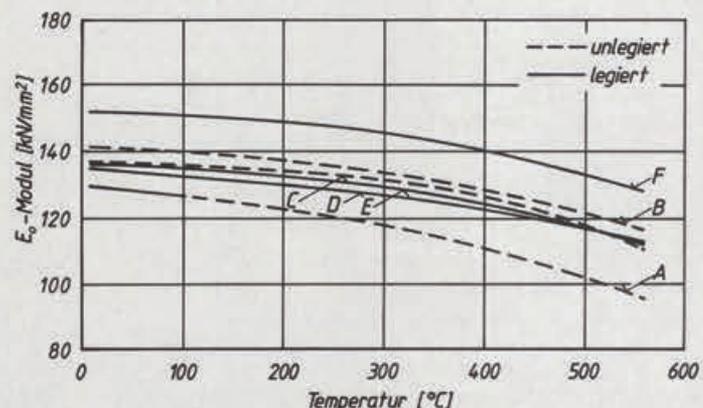
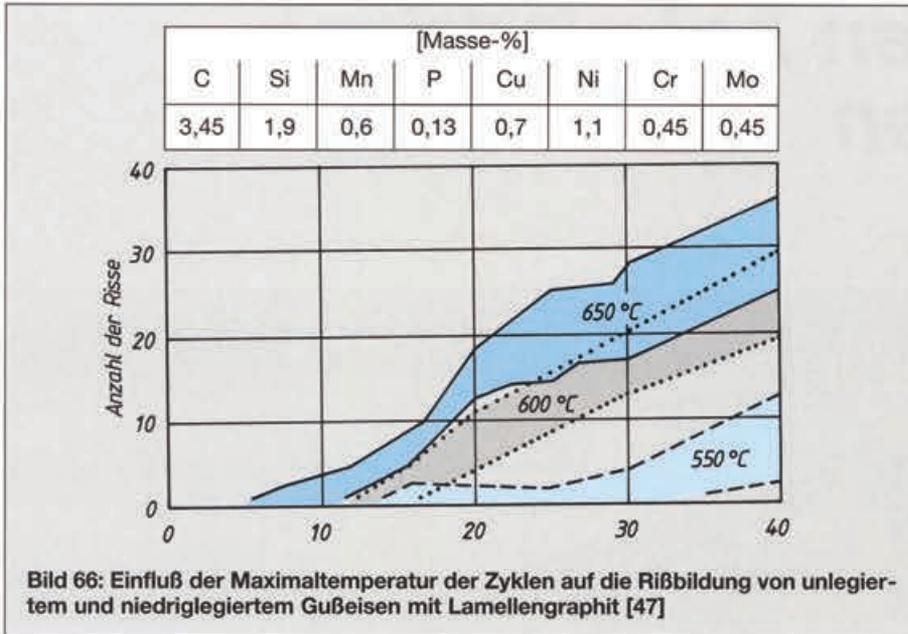


Bild 65: Temperaturabhängigkeit des Elastizitätsmoduls E₀ verschiedener Sorten Gußeisen mit Lamellengraphit [44]



- Verbesserung der Wärmeleitfähigkeit und Verminderung des E-Moduls, um die thermischen Spannungen zu senken,
- eine höhere Warmfestigkeit und Kriechbeständigkeit, um die plasti-

- sche Verformung und die Relaxation zu vermindern und so die Spannungen im elastischen Bereich zu halten,
- höhere Festigkeit und Duktilität, um Rißbildung zurückzudrängen,

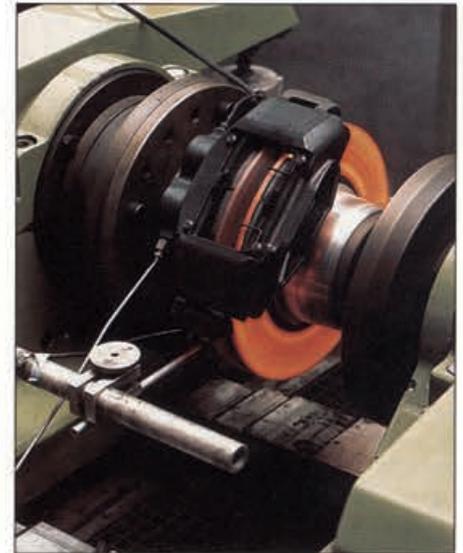


Bild 68: Bremscheibe aus GJL-150 auf dem Prüfstand

- Stabilisieren des Perlits, um die Werkstoffeigenschaften langfristig zu erhalten.

Diese Forderungen sind widersprüchlich und lassen sich am ehesten durch Legieren erfüllen. Die hohe Wärmeleitfähigkeit und der niedrige E-Modul erfordern ein Eisen mit hohem Graphitgehalt, das heißt mit einem hohen Sättigungsgrad, Festigkeit und Perlitstabilität können durch Legieren erreicht werden.

Zum Erhöhen der Kriechfestigkeit kommt vor allem Molybdän in Kombination mit Chrom zur Perlitstabilisierung in Frage, beide Elemente werden zweckmäßig mit Kupfer und/oder Nickel ergänzt. Nach Bild 67 hängt der Widerstand gegen Temperaturwechselrisse vor allem vom Molybdängehalt ab, das heißt von der Warmfestigkeit und nicht von der Zugfestigkeit. Bei raschen Temperaturwechseln sind die entscheidenden Größen die Wärmeleitfähigkeit und der E-Modul, bei langsameren die Festigkeit und der Widerstand gegen das Kriechen.

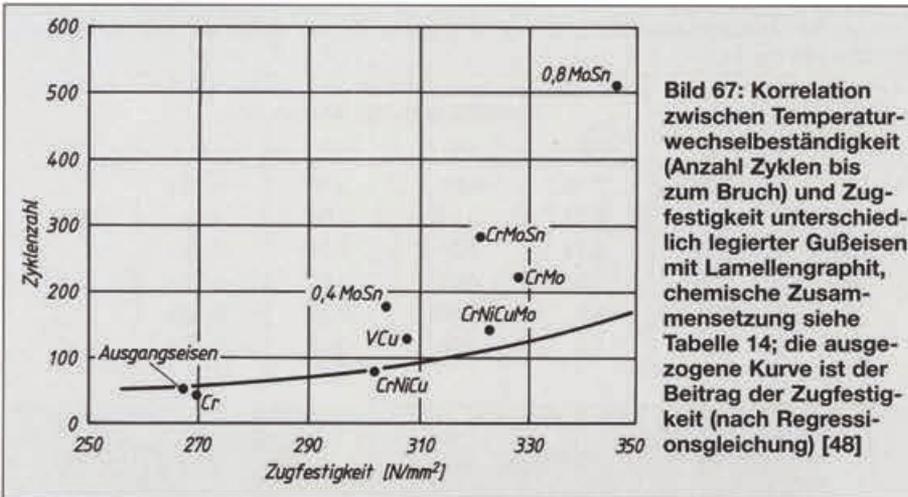


Tabelle 14: Zusammensetzung der untersuchten Werkstoffe [48]

Bezeichnung	[Masse-%]								
	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	Cu	V	Sn
Ausgangseisen	3,43	1,65	0,57	0,11	0,004	0,11	0,11	-	-
Cr	3,39	1,75	0,64	0,30	< 0,01	0,10	0,11	-	-
CrNiCu	3,45	1,74	0,59	0,49	0,004	0,60	0,59	-	-
0,4MoSn	3,44	1,69	0,58	0,21	0,38	0,10	0,30	-	0,077
VCu	3,44	1,74	0,76	0,12	< 0,01	0,12	1,48	0,30	-
CrMoSn	3,40	1,76	0,65	0,31	0,48	0,11	0,11	-	0,093
CrNiCuMo	3,45	1,68	0,63	0,30	0,30	0,97	0,87	-	-
CrMo	3,43	1,66	0,58	0,50	0,39	0,10	0,12	-	-
0,8MoSn	3,26	1,56	0,63	0,20	0,76	0,11	0,10	-	0,057



Bild 69: Vierteliger Diffusor aus niedriglegiertem GJL für einen Glühofen, Gesamtgewicht: 720 kg

Eigenschaften bei niedrigen Temperaturen

Die mechanischen Eigenschaften von Gußeisen mit Lamellengraphit bei niedrigen Temperaturen ergeben sich aus dem Verhalten des Ferrits. Das gilt auch für perlitische Gußeisensorten, da Perlit zu wesentlichen Teilen aus Ferrit besteht. Die untere Streckgrenze von Ferrit erhöht sich mit sinkender Temperatur.

Die Zunahme der Zugfestigkeit mit sinkender Temperatur für verschiedene Sorten Gußeisen mit Lamellengraphit zeigt *Bild 70*, *Tabelle 15* nennt deren chemische Zusammensetzung. Der Festigkeitsanstieg ist bei den Sorten Nr. 5 und 6, die GJL-250 oder GJL-200 entsprechen, steiler als bei den härtesten Sorten Nr. 1 und 2 (~ GJL-300).

Gußeisen mit Lamellengraphit zeigt bereits bei kleinen Spannungen als Folge der hohen Spannungskonzentration zwischen den Graphitlamellen und Ablösevorgängen am Graphit eine bleibende Verformung. Der Widerstand dagegen nimmt mit sinkender Temperatur zu. Die Zugspannungen, bei denen eine bleibende Verformung um 0,1 % eintritt, also praktisch die 0,1 %-Dehngrenzen, sind in *Bild 71* für die Sorten Nr. 1 bis 3 nach *Tabelle 15* aufgetragen. Der Anstieg ist bis -150°C linear.

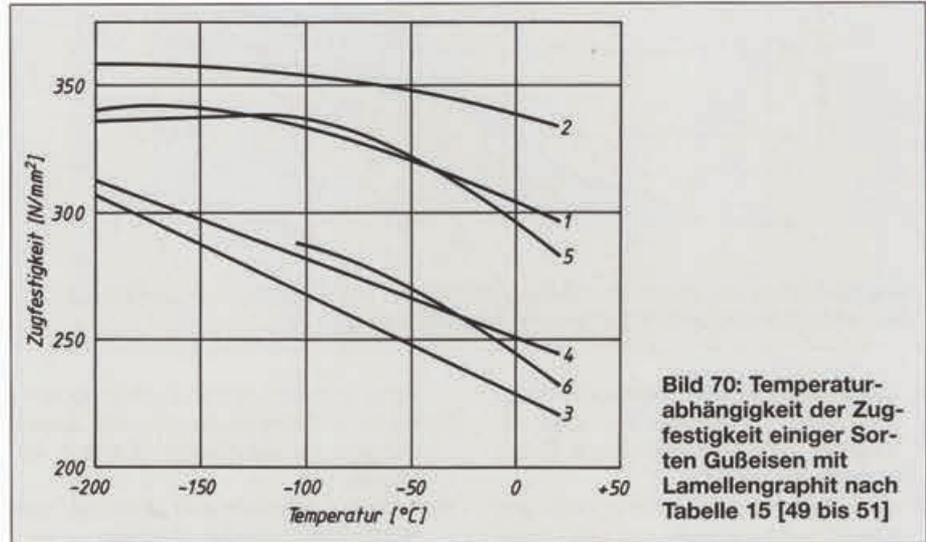


Bild 70: Temperaturabhängigkeit der Zugfestigkeit einiger Sorten Gußeisen mit Lamellengraphit nach *Tabelle 15* [49 bis 51]

Tabelle 15: Zusammensetzung der untersuchten Sorten Gußeisen mit Lamellengraphit [49 bis 51]

Nr.	Zusammensetzung [Masse-%]					
	C	Si	Mn	S	P	Ni
1	3,25	2,13	0,52	0,03	0,09	–
2	3,25	1,77	0,50	0,03	0,09	2,0
3	2,98	2,13	0,55	0,03	0,09	–
4	3,0	1,82	0,55	0,03	0,09	2,0
5	3,3	2,0	0,80	0,03	0,025	–
6	3,2	1,9	0,69	0,03	0,039	–

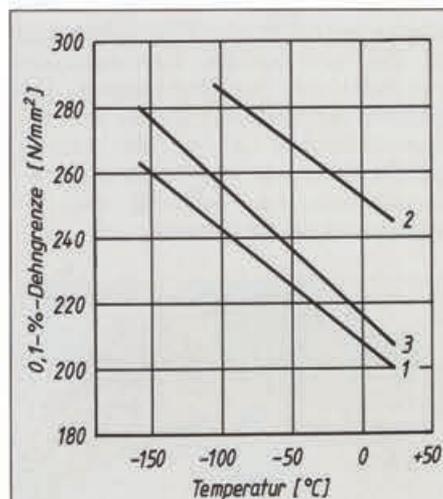


Bild 71: Temperaturabhängigkeit der 0,1%-Dehngrenze von drei Gußeisen mit Lamellengraphit nach *Tabelle 15* [49]

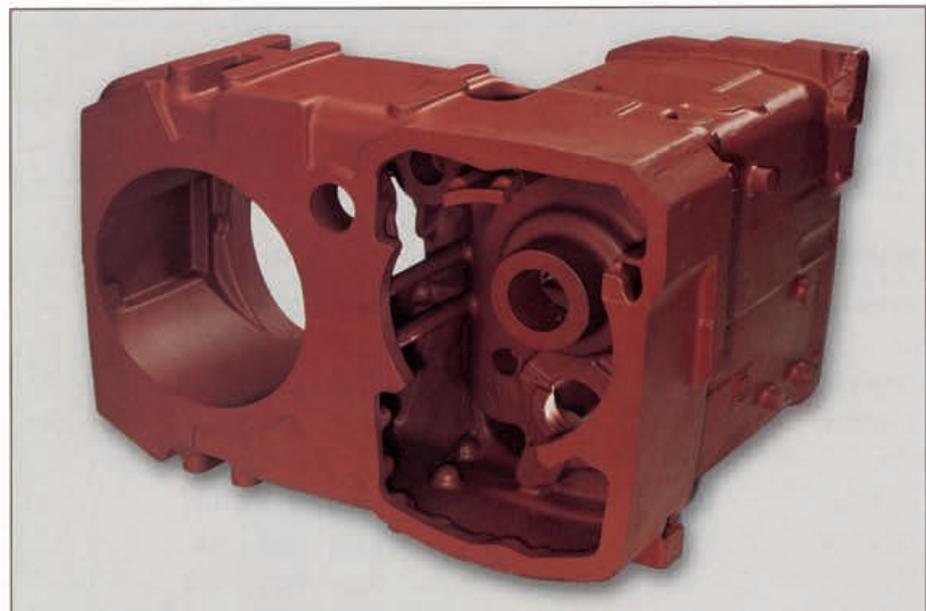


Bild 72: Getriebegehäuse aus GJL-250 für eine Baumaschine, Gewicht: 238 kg

Tabelle 16: Einfluß abnehmender Temperatur auf den Elastizitätsmodul von Gußeisen mit Lamellengraphit [49]

Nr.*)	E-Modul bei einer Temperatur von			
	+ 20 °C	- 50 °C	- 100 °C	- 150 °C
	[kN/mm ²]			
1	126	130	131	132
2	130	132	133	134
3	140	143	145	148
4	143	143,5	144	146

*) Nach Tabelle 15

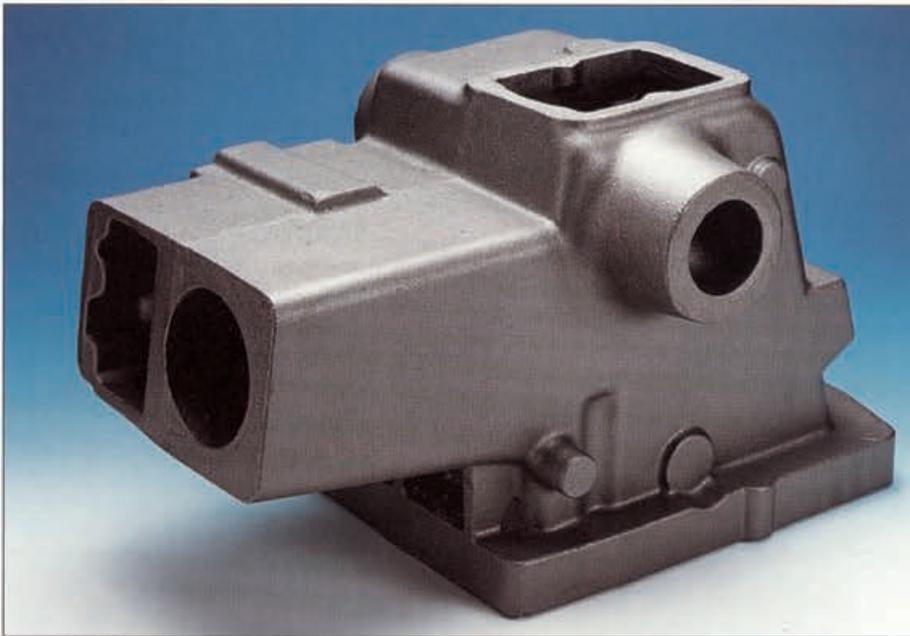


Bild 73: Achsgehäuse für einen Traktor; Werkstoff: GJL-250, Gewicht: 81,5 kg

Gußeisen mit Lamellengraphit gilt allgemein als spröder Werkstoff, der verformungslos bricht. Dies ist nicht ganz korrekt, denn mit hinreichend genauen Verfahren lassen sich vor allem bei hochfesten Sorten Bruchdehnungswerte ermitteln, die allerdings fast immer kleiner als 1 % sind und meist sogar unter 0,5 % liegen. In *Bild 74* sind die Bruchdehnungswerte gesamt, nämlich die plastische plus die elastische Dehnung, und außerdem die elastische Dehnung der Sorten Nr. 1 bis 3 nach *Tabelle 15* in Abhängigkeit von der Temperatur aufgetragen. Als Folge des Rückgangs der plastischen Dehnung bei gleichzeitig leichtem Anstieg des elastischen Anteils geht die Gesamtdehnung mit sinkender Temperatur zurück.

Der Elastizitätsmodul nimmt nach *Tabelle 16* mit sinkender Temperatur geringfügig zu, wobei der Anstieg etwa linear ist.

Die Härte steigt mit sinkender Temperatur recht stark an. Zwischen Raumtemperatur und -196 °C beträgt die Zunahme bei perlitischen, unlegierten und niedriglegierten Sorten etwa 100 HB-Einheiten, bei ferritisch geglühtem Gußeisen mit 3,7 % C etwa 70 HB-Einheiten [52].

Die Zähigkeit unter dynamischer Belastung geht mit sinkender Temperatur zurück. In der Praxis wird die bei zäheren Werkstoffen übliche Bestimmung

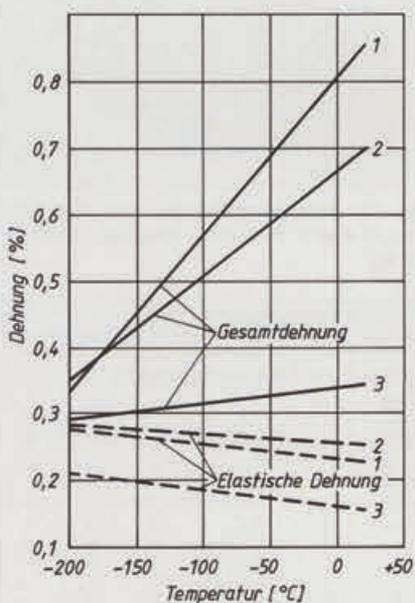


Bild 74: Temperaturabhängigkeit der Gesamtdehnung und der elastischen Dehnung von drei Gußeisen mit Lamellengraphit nach *Tabelle 15* [49]

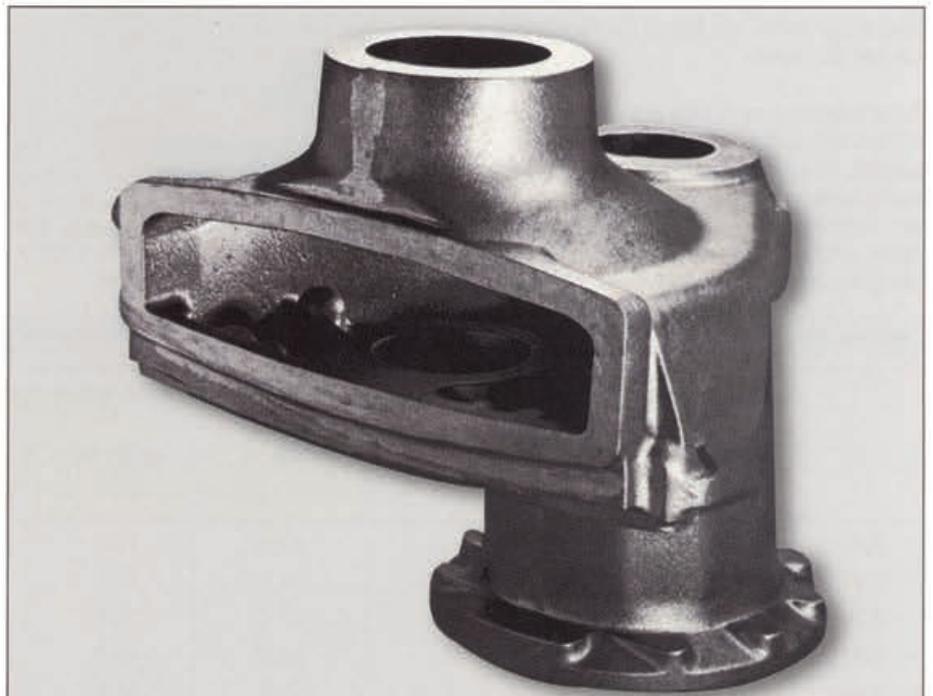


Bild 75: Achsgehäuse für ein schweres Nutzfahrzeug; Werkstoff: GJL-300, Gewicht: 72,6 kg

der Kerbschlagarbeit wegen der niedrigen und sehr ungenauen Meßwerte nicht durchgeführt, sondern es wird bei GJL die Schlagarbeit bestimmt. Sie wird durch steigende Gehalte an Kohlenstoff und Silicium, das heißt Erhöhen des Sättigungsgrades, durch Carbide und vor allem durch Phosphor vermindert, während eine Kornfeinung, also ein Erhöhen der eutektischen Kornzahl, sie erheblich steigert. Bild 76 zeigt typische Kurvenverläufe für die in Tabelle 17 genannten Werkstoffe. Die Schlagarbeit nimmt mit sinkender Temperatur ab, wobei der Abfall bei den ursprünglich zäheren Eisen steiler ist. Bei diesen läßt sich eine Übergangstemperatur erkennen, die je nach Sorte im Bereich zwischen -20 und -60 °C liegt [50, 53 bis 55].

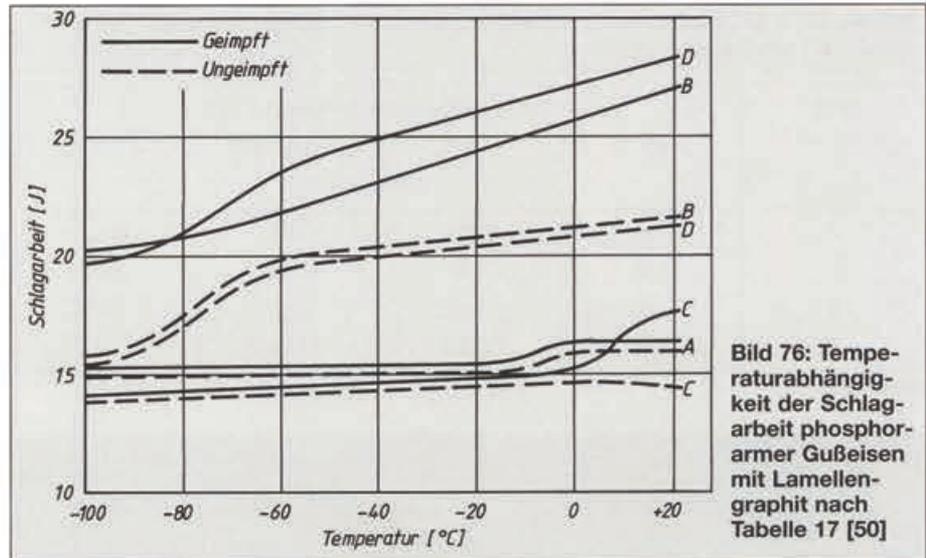


Bild 76: Temperaturabhängigkeit der Schlagarbeit phosphorarmer Gußeisen mit Lamellengraphit nach Tabelle 17 [50]

Die Dauerwechselfestigkeit von Gußeisen mit Lamellengraphit bei tiefen Temperaturen ändert sich im Bereich zwischen +27 und -40 °C sowohl bei gekerbten als auch bei ungekerbten Proben praktisch nicht [54].

Tabelle 17: Chemische Zusammensetzung der entsprechend Bild K4 untersuchten Werkstoffe [50]

Nr.	Zusammensetzung [Masse-%]					S _c ^{*)}
	C	Si	Mn	P	S	
A	3,0	2,8	0,8	0,02	0,03	0,88
B	3,1	2,9	0,8	0,02	0,12	0,92
C	3,3	1,7	0,8	0,02	0,03	0,88
D	3,2	1,8	0,8	0,02	0,12	0,87

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

Tabelle 18 enthält Angaben über die Temperaturabhängigkeit des thermischen Längenausdehnungskoeffizienten einiger Sorten. Die Werte nehmen mit sinkender Temperatur deutlich ab.

Die Wärmeleitfähigkeit von perlitischem Gußeisen mit Lamellengraphit fällt im Bereich von +100 °C bis +450 °C um 1,5 bis 1,9 W/(K × m) für je 100 K Temperaturanstieg [16]. Daraus kann geschlossen werden, daß sie mit sinkender Temperatur um den gleichen Faktor zunimmt, da keine Gefügeänderungen auftreten.



Bild 77: Getriebegehäuse aus GJL-250 für einen Bagger; Abmessungen: 1400 × 1400 × 400 mm, Gewicht: 705 kg

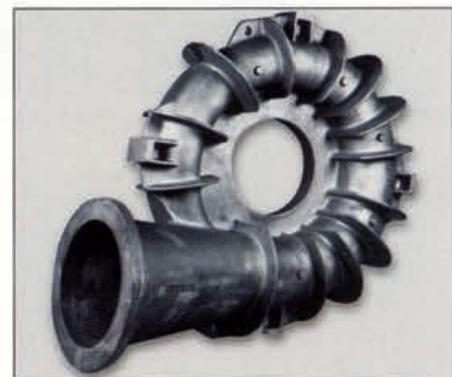


Bild 78: Pumpengehäuse aus GJL-250 zum Fördern tiefkalter Medien, Gewicht: 870 kg

Zusammenfassend läßt sich sagen, daß ein Bauteil aus Gußeisen mit Lamellengraphit, das bei Raumtemperatur zuverlässig seinen Dienst tut, auch bei tieferen Temperaturen nicht versagt, es sei denn, andere Umgebungsbedingungen verschlechtern sich.

Tabelle 18: Thermische Ausdehnungskoeffizienten von Gußeisen mit Lamellengraphit bei tiefen Temperaturen [51]

Zusammensetzung [Masse-%]				Thermischer Ausdehnungskoeffizient im Temperaturbereich von/bis				
C	Si	Mn	Ni	[µm/(m × K)]				
				0/200 °C	0/-25 °C	-25/-50 °C	-50/-75 °C	-75/-100 °C
3,12	1,92	0,90	-	10,5	10,1	9,1	8,5	8
3,13	2,31	0,70	-	11,6	10,0	9,5	8,2	7,5
3,79	3,06	0,63	-	11,7	10,6	10,5	9,2	8,7
2,91	1,37	0,87	-	10,6	10,7	10,4	9,1	8,4
2,89 ^{*)}	1,68	0,34	2,13	10,6	10,1	9,7	8,7	6,6

*) Enthält etwa 30 % Ferrit (Rest Perlit), alle anderen Sorten sind perlitisch

Bruchmechanische Eigenschaften

Die Bewertung der Bruchsicherheit von Gußteilen mit Hilfe bruchmechanischer Kriterien, die zunehmend Eingang in das internationale Regelwerk finden, wird praktiziert, wenn Gußwerkstoffe aufgrund ihrer spezifischen Vorteile in festigkeitsbeanspruchten und potentiell bruchgefährdeten Konstruktionen zum Einsatz kommen. Gegenstand des SINTAP (Structural Integrity Assessment Procedures)-Projekts ist die Vereinheitlichung der vorhandenen Prozeduren zur Anwendung bruchmechanischer Bewertungskonzepte auf europäischer Ebene mit dem Ziel der Integration in das europäische Regelwerk [56]. Die Sicherheitsbewertung erfolgt dabei auf der Basis quantitativer Korrelation zwischen der Bauteilbeanspruchung, der Größe vorhandener oder hypothetisch angenommener Risse oder rißähnlicher Spannungskonzentrationsstellen und der Bruchzähigkeit des Werkstoffs, definiert als Werkstoffwiderstand gegen Risseinleitung oder Rißausbreitung bei statischer, dynamischer oder zyklischer Beanspruchung.

Die bereits vorliegenden Ergebnisse bruchmechanischer Bewertungen von Gußwerkstoffen und Gußteilen belegen eindeutig, daß ihre Beanspruchbarkeit und Bruchsicherheit höher ist, als es

die relativ niedrige Kerbschlagarbeit erwarten läßt. Aus dieser realeren Bewertung der Bruchsicherheit von Gußeisen im direkten Vergleich mit Stahl und Stahlguß lassen sich zusätzliche Einsatzbereiche für Gußwerkstoffe in festigkeitsbeanspruchten Konstruktionen ableiten [57]. Eine wesentliche Voraussetzung für die Anwendung dieses Konzeptes besteht in der Verfügbarkeit bruchmechanischer Kennwerte sowohl für die Berechnung zulässiger Fehlergrößen oder Bauteilbeanspruchungen bei statischer oder schlagartiger Belastung als auch für die umfassende Bewertung der Betriebsfestigkeit zyklisch beanspruchter Gußteile. Die signifikante Abhängigkeit dieser Werkstoffkennwerte von den gießtechnischen Herstellungsbedingungen ist die Basis für eine Optimierung der Festigkeits- und Zähigkeitseigenschaften von Gußwerkstoffen unter Beachtung qualitätssichernder Maßnahmen. Mit der Einbeziehung bruchmechanischer Kennwerte in die beanspruchungsgerechte Werkstoffauswahl kann der Konstrukteur bei Beachtung einer festigkeits- und zähigkeitskontrollierten Bruchsicherheit des Bauteils wesentlich fundiertere Entscheidungen zum Werkstoffeinsatz treffen, als das auf der Basis der Schlag- oder Kerbschlagarbeit möglich ist.

Statische Beanspruchung

Die Bestimmung bruchmechanischer Kennwerte erfolgt in Abhängigkeit vom Gefüge und den Beanspruchungsbedingungen (Temperatur, Belastungsgeschwindigkeit) nach dem Konzept der linear-elastischen Bruchmechanik (LEBM) bei elastischem Werkstoffverhalten (ebener Dehnungszustand) beziehungsweise bei elastisch-plastischem Werkstoffverhalten nach dem Konzept der Fließbruchmechanik (FBM).

Mit der Einführung der Bruchmechanik und ihrer Anwendung auf Gußeisen mit Lamellengraphit [58 bis 64] machen die auf der Grundlage des LEBM-Konzeptes ermittelten Kennwerte auf die Abhängigkeit des Rißausbreitungswiderstandes von der Zähigkeit des Grundgefüges, der Graphitmorphologie und den Beanspruchungsbedingungen aufmerksam. Die Ermittlung gültiger, das heißt auf das Bauteil übertragbarer K_{Ic} -Werte setzt Werkstoffversagen im Experiment durch instabile Rißausbreitung unter den Bedingungen des ebenen Dehnungszustandes voraus. Die Analyse der bei Gußeisen mit Lamellengraphit ablaufenden Schädigungsmechanismen zeigt, daß es aufgrund der inneren Kerbwirkung sowohl zu plastischen Verformungsanteilen als auch zum Bruch der Graphitlamellen kommt, wodurch der Bruch durch eine stabile Risseinleitung und Rißausbreitung initiiert wird [65]. Daher können gültige bruchmechanische Kennwerte für die Bauteilbewertung nur über das FBM-Konzept bestimmt werden [66, 67], wobei die Rißinitiiierungswerte des J-Integral oder CTOD-Konzeptes den Beginn der stabilen Rißausbreitung definieren.

Table 19 zeigt die an 25 mm dicken CT-Proben nach der Compliance Methode bestimmten, gefügeabhängigen Bruchzähigkeitswerte, wobei die ermittelten Rißinitiiierungswerte des J-Integral-Konzeptes nach

$$K = \left[\frac{E \times J}{1 - \nu^2} \right]^{1/2} \quad (1)$$

mit
E = Elastizitätsmodul
 ν = Poissonsche Konstante

in K_{Ic} -Werte umgerechnet wurden.

Tabelle 19: Bruchmechanische Kennwerte für Gußeisen mit Lamellengraphit verschiedener Hersteller [66]

Zugfestigkeit R_m [N/mm ²]	Härte HB 30	Bruchzähigkeit K_{Ic} [MPa m ^{1/2}]	Grundgefüge
121	86	36,7	Ferrit
130	182	23,2	Perlit
144	180	21,0	Perlit
211	207	22,1	Martensit
214	176	35,4	Perlit
216	202	24,6	Bainit
219	152	41,8	Ferrit-Perlit
221	220	27,8	Perlit
228	218	31,6	Perlit
242	220	30,4	Perlit
312	227	38,8	Perlit
374	234	42,7	Perlit
428	204	46,4	Ferrit-Perlit*)
647	311	45,7	Bainit*)

*) E-Graphit, alle anderen Sorten A-Graphit

Die für Gußeisen mit Lamellengraphit charakteristische direkte Proportionalität zwischen Zugfestigkeit und Bruchzähigkeit (Bild 79) kann auf den Einfluß der Graphitmorphologie zurückgeführt werden, da mit abnehmender Teilchenzahl und -größe die innere Kerbwirkung des Graphits ab- und der Einfluß des Grundgefüges zunimmt.

Zyklische Beanspruchung

Die Gesamtlebensdauer eines zyklisch beanspruchten Gußteils setzt sich aus der anrißfreien Phase, der Rißbildungsphase und der Rißausbreitungsphase zusammen. Im Rahmen umfassender Betriebsfestigkeitsanalysen kommen bruchmechanische Rißwachstums-konzepte sowohl zur gefügeabhängigen Bewertung des Rißausbreitungswiderstandes als auch zur Berechnung der Bauteillebensdauer zum Einsatz. Die Kennwertermittlung erfolgt über die experimentelle Bestimmung zyklischer Rißwachstumskurven (da/dN - ΔK -Kurven), wobei an Gußeisen die Rißwachstumsgeschwindigkeit da/dN in Abhängigkeit vom zyklischen Spannungsintensitätsfaktor ΔK mit der Compliance-Methode, über die Messung der Resonanzschwingdauer, mit optischen Messungen sowie mit Hilfe der Potentialmethode und Ultraschallmessungen bestimmt wird. Eine ausführliche Bewertung gefüge- und beanspruchungsbedingter Einflußgrößen auf den Verlauf der da/dN - ΔK -Kurve wird in [68] gegeben. Der lineare Bereich der da/dN - ΔK -Kurve wird durch die Paris-Erdogan-Gleichung

$$\frac{da}{dN} = C[\Delta K]^m \quad (2)$$

mit

$$\Delta K = \Delta\sigma (\pi \times \alpha)^{1/2} \times f \quad (3)$$

C, m = werkstoff- bzw. belastungsabhängige Konstanten

f = Geometriefaktor

$\Delta\sigma$ = σ_o (Oberspannung) - σ_u (Unterspannung)

beschrieben.

Integriert man Gleichung (2) in den Grenzen von a_o (Ausgangsrißlänge) bis a_c (kritische Rißlänge), kann die Restlebensdauer N_B (Bruchschwingspielzahl) des rißbehafteten Gußteils berechnet werden, wenn C und m bekannt sind:

$$N_B = \int_{a_o}^{a_c} \frac{da}{C[\Delta K]^m} \quad (4)$$

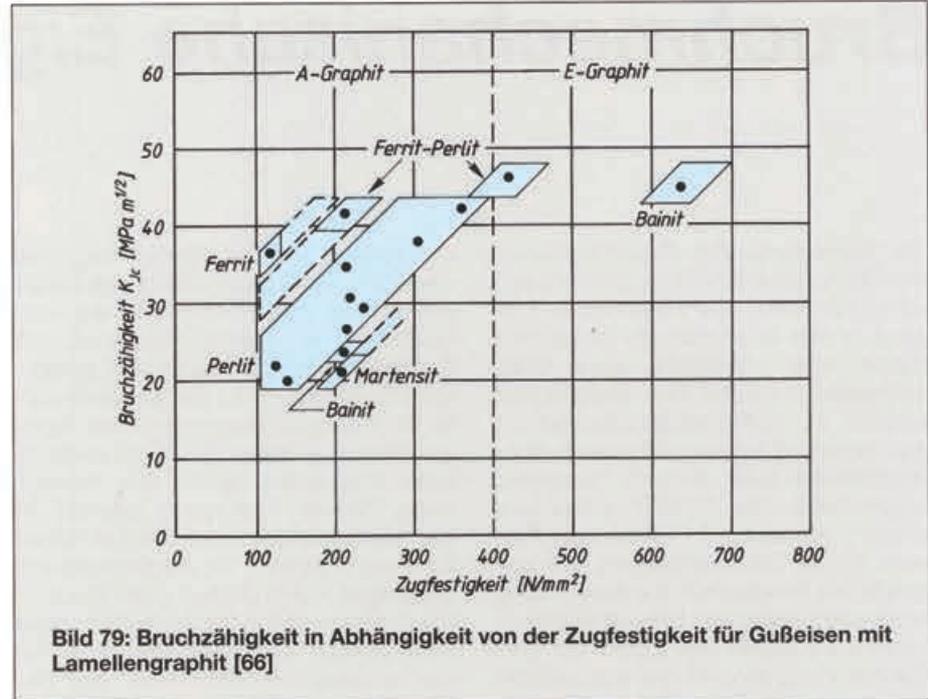


Bild 79: Bruchzähigkeit in Abhängigkeit von der Zugfestigkeit für Gußeisen mit Lamellengraphit [66]

Für Gußeisen mit Lamellengraphit liegen hierzu, im Gegensatz zu Gußeisen mit Kugel- oder Vermiculargraphit, relativ wenige Angaben vor, die zusätzlich aufgrund unterschiedlicher Meßmethoden, Gußeisensorten und Beanspruchungsparameter (Frequenz, R-Wert) nur bedingt vergleichbar sind. Die nach [64] für ein niedriglegiertes GJL-350 ($R_m = 391 \text{ N/mm}^2$, 0,66 % Cr, 0,81 % Ni und 0,52 % Mo) bei $R = 0,1$ ermittelten Werte $\Delta K_o = 6,74 \text{ MPa m}^{1/2}$, $m = 6,68$ und $C = 3,84 \cdot 10^{-15} \text{ m/Lastwechsel}$ lassen sich dagegen ohne weiteres in das Streuband (Bild 80) einordnen. Aus vergleichenden Untersuchungen an GJL-100, GJS-400 und GJV-300 bei $R = 0,1$ folgt, daß Gußeisen mit Lamellengraphit den niedrigsten ΔK_o -Wert und bei gleichem ΔK die höchsten Rißwachstumsraten aufweist [70]. Die Überprüfung der Gültigkeit des in [71] formulierten allgemeingültigen Rißwachstumsgesetzes

$$\frac{da}{dN} = 5,1 \times 10^9 \left[\frac{\Delta K}{E} \right]^{3,5} \quad (5)$$

mit

da/dN = Rißfortschritt in mm/Lastwechsel,

ΔK = Spannungsintensitätsfaktor in $\text{MPa m}^{1/2}$,

E = Elastizitätsmodul in GPa

für Gußeisenwerkstoffe zeigt, daß insbesondere bei GJL-100 die gemessenen da/dN -Werte wesentlich oberhalb der Geraden nach Gleichung (5) liegen, bei GJL-200 und GJL-350 eine Übereinstimmung bis $\Delta K = 15 \text{ MPa m}^{1/2}$ zu verzeichnen ist [61].

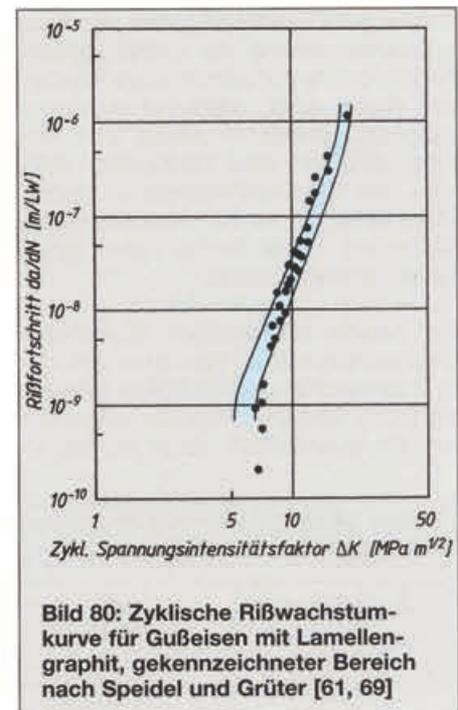


Bild 80: Zyklische Rißwachstumskurve für Gußeisen mit Lamellengraphit, gekennzeichnete Bereich nach Speidel und Grüter [61, 69]

Physikalische Eigenschaften

Weil Kohlenstoff einen wesentlichen Einfluß auf die Gefügeausbildung von Fe-C-Legierungen hat und bei Gußeisen mit Lamellengraphit als nicht-metallische Phase in einem metallischen Grundgefüge vorliegt, ändern sich in Abhängigkeit vom Kohlenstoffgehalt auch einige physikalische Eigenschaften.

Wegen der außerordentlich vielfältig zu beeinflussenden physikalischen Eigenschaften können definitive Angaben für Gußeisen mit Lamellengraphit häufig nur mit einer gewissen Schwankungsbreite unter Berücksichtigung – sofern bekannt – der Gefügeausbildung und der chemischen Zusammensetzung gemacht werden.

Für Gußeisen mit Lamellengraphit gibt es keine fest definierten chemischen Zusammensetzungen, sondern ein



Bild 81: Anlassergehäuse für die Lichtmaschine von Nutzfahrzeugen, Werkstoff: GJL-200, Gewicht: 2,6 kg

Tabelle 20: Physikalische, magnetische und elektrische Eigenschaften von Gußeisen mit Lamellengraphit, Anhaltswerte [16, 72, 73]*

Merkmal		Werkstoffbezeichnung GJL-...					
		150	200	250	300	350	400
Dichte	ρ [g/cm ³]	7,10	7,15	7,20	7,25	7,30	7,30
Thermischer Längenausdehnungskoeffizient	α [$\mu\text{m}/(\text{m} \times \text{K})$]	zwischen -100 °C und +20 °C: 10,0 zwischen 20 °C und 200 °C: 11,5 zwischen 20 °C und 400 °C: 13,0					
Wärmeleitfähigkeit	λ [W/(m x K)]	52,5	50,8	48,8	47,4	45,7	44,0
	bei 100 °C	51,5	49,8	47,8	46,4	44,7	43,0
	bei 200 °C	50,5	48,8	46,8	45,4	43,7	42,0
	bei 300 °C	49,5	47,8	45,8	44,4	42,7	41,0
	bei 400 °C	48,5	46,8	44,8	43,4	41,7	40,0
Spezifische Wärmekapazität	c [J/(kg x K)]	265	375	460	460	460	460
	zwischen 20 °C und 200 °C	355	430	495	495	495	495
	zwischen 20 °C und 300 °C	400	450	505	505	505	505
	zwischen 20 °C und 400 °C	425	470	515	515	515	515
	zwischen 20 °C und 500 °C	445	490	535	535	535	535
	zwischen 20 °C und 600 °C	490	545	605	605	605	605
Koerzitivfeldstärke	H_o [A/m]	560 bis 720					
Hystereseverluste bei B = 1 T	[J/m ³]	2500 bis 3000					
Maximale Permeabilität	μ [$\mu\text{H}/\text{m}$]	220 bis 380					
Spezifischer elektrischer Widerstand	ρ [$\Omega \times \text{mm}^2/\text{m}$]	0,89	0,77	0,73	0,70	0,67	0,64

*) Bei besonderen Anforderungen an die Bearbeitbarkeit, die Dämpfung oder die magnetischen Eigenschaften wird GJL-100 eingesetzt. Die geforderten Eigenschaften können über eine gefügeändernde Wärmebehandlung eingestellt werden. GJL-100 ist hier nicht aufgeführt.

Gußstück aus GJL wird nach gewünschten Festigkeits- oder Härtewerten bestellt, die dann in Abhängigkeit von der Wanddicke durch einen entsprechenden Sättigungsgrad eingestellt werden. Höhere Festigkeitswerte haben in der Regel einen niedrigen Sättigungsgrad, das heißt niedrigen Kohlenstoffgehalt. Dies erklärt, warum die meisten der in *Tabelle 20* genannten physikalischen Eigenschaften sich mit der Zugfestigkeit und dem Grundgefüge ändern. Einige dieser Eigenschaften werden nachfolgend mit Ergebnissen von Versuchen verglichen, bei denen Gußeisen mit Kugelgraphit (GJS) und Gußeisen mit Lamellengraphit (GJL) in Abhängigkeit von der Temperatur untersucht wurden; die chemische Zusammensetzung dieser Werkstoffe nennt *Tabelle 21*.

Tabelle 21: Chemische Zusammensetzung der untersuchten Gußeisensorten

Sorte	[Masse-%]									
	C	Si	Mn	P	S	Mg	Ni	Mo	Cu	Cr
GJS	3,83	2,51	0,35	0,03	0,07	0,052	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
GJL	3,12	2,61	0,65	0,14	0,105	n.b.	0,07	0,02	0,12	0,06

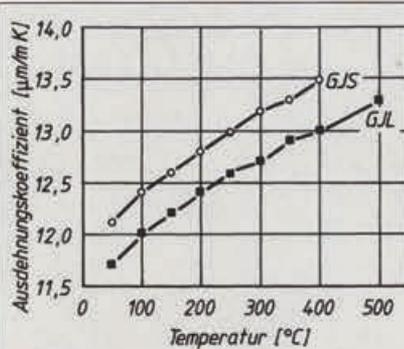


Bild 82: Mittlerer thermischer Längenausdehnungskoeffizient von GJS und GJL in Abhängigkeit von der Temperatur [75, 76]

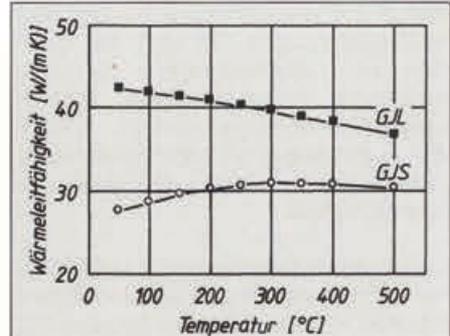


Bild 83: Wärmeleitfähigkeit von GJS und GJL in Abhängigkeit von der Temperatur [75, 76]

Dichte

Die Zunahme der Dichte mit der Zugfestigkeit ist mit den geringeren Kohlenstoffgehalten und mit den daraus resultierenden geringeren Gehalten an ausgeschiedenem Graphit zu erklären.

Thermischer Längenausdehnungskoeffizient

Der mittlere thermische Längenausdehnungskoeffizient kann nach *Tabelle 20* im Temperaturbereich von 20 bis 400 °C mit etwa 10 bis 13 µm/(m × K) angenommen werden. Im Vergleich dazu werden in *Bild 82* etwa 10 % höhere Werte genannt. Diese Unterschiede werden wahrscheinlich, ebenso wie die zwischen GJS und GJL in *Bild 82*, von der unterschiedlichen Gefügeausbildung begründet. So ist zum Beispiel der thermische Längenausdehnungskoeffizient von GJS mit perlitischem Gefüge kleiner als der mit einem ferritischen Gefüge [75].

Angaben zu höheren (bis 750 °C) und niedrigeren Temperaturen (bis -100 °C) enthalten die *Tabellen 22* und *23*.

Tabelle 22: Thermischer Längenausdehnungskoeffizient von GJL-300 im Bereich zwischen Raumtemperatur und 750 °C (Mittelwerte) [80]

Prüf­temperatur [°C]	Thermischer Längenausdehnungskoeffizient α	
	[µm/(m × K)]	[µm/(m × K)]
20	-	9,87
20 bis 100	10,92	-
100	-	11,76
20 bis 200	11,77	-
200	-	13,10
20 bis 300	12,40	-
300	-	14,13
20 bis 400	12,95	-
400	-	14,60
20 bis 500	13,26	-
500	-	14,60
20 bis 600	13,58	-
600	-	14,80
20 bis 700	13,78	-
700	-	17,13
20 bis 750	14,15	-
750	-	20,33

Tabelle 23: Thermischer Längenausdehnungskoeffizient von perlitischem GJL bei niedrigen Temperaturen [51]

Nr.	Zusammensetzung [Masse-%]			Thermischer Längenausdehnungskoeffizient [µm/(m × K)] im Temperaturbereich von/bis			
	C	Si	Mn	0/-25 °C	-25/-50 °C	-50/-75 °C	-75/-100 °C
1	3,12	1,92	0,90	10,1	9,1	8,5	8
2	3,13	2,31	0,70	10,0	9,5	8,2	7,5
3	3,79	3,06	0,63	10,6	10,5	9,2	8,7
4	2,91	1,37	0,87	10,7	10,4	9,1	8,4

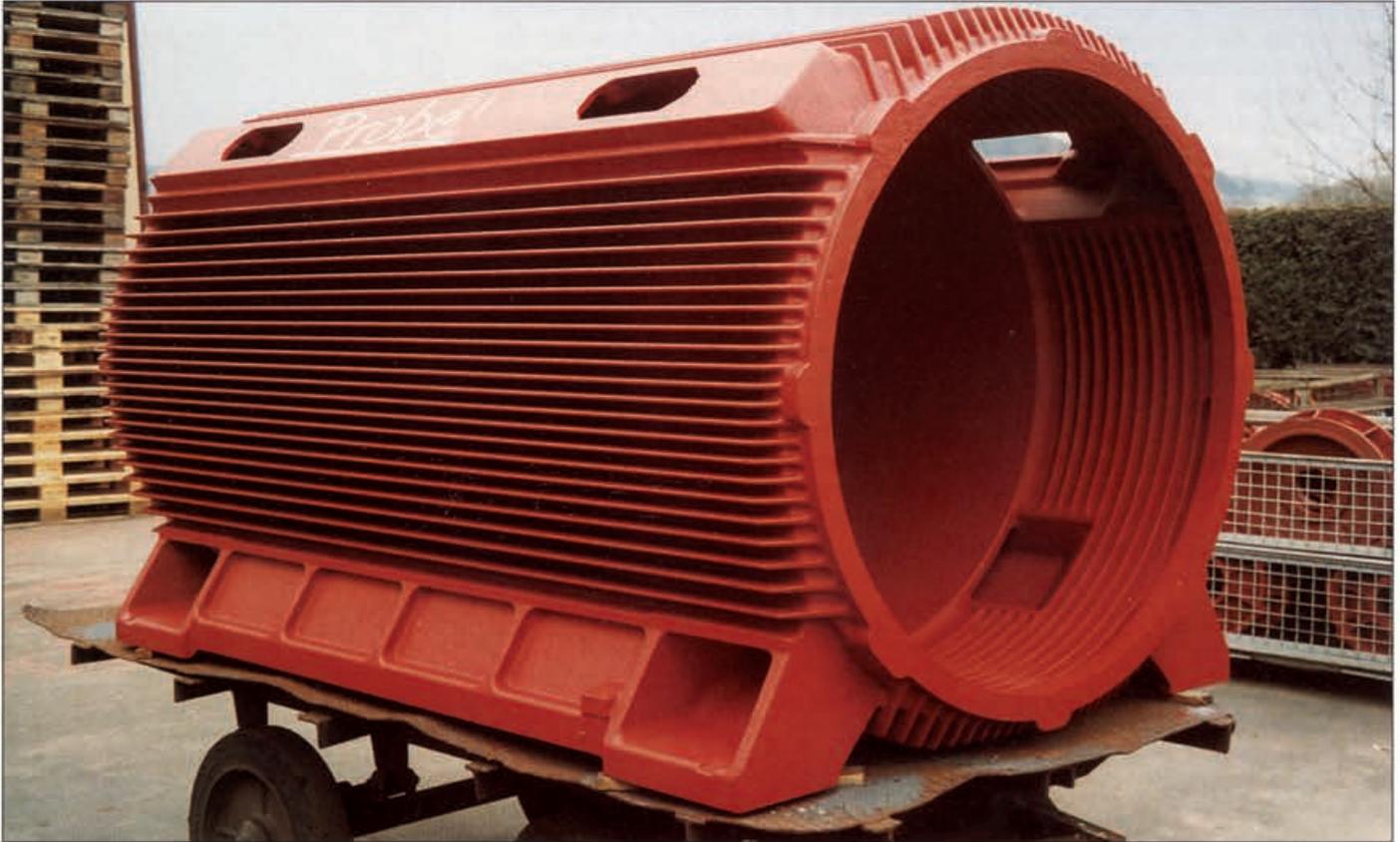


Bild 84: Derzeit weltgrößtes Ständergehäuse für einen Elektromotor mit einer Leistung von 3000 kW; Werkstoff: GJL-200, Abmessungen: $\varnothing 1260 \times 2130$ mm, Gewicht: 3,5 t

Wärmeleitfähigkeit

In Gußeisen mit Lamellengraphit erfolgt die Wärmeleitung vorwiegend über die Graphitlamellen, so daß sie entscheidend von deren Länge abhängig ist und über diese auch bewußt eingestellt werden kann. In einem ferritischen Eisen, das heißt in einem Eisen mit einer geringen Zugfestigkeit, ist der Kohlenstoffgehalt höher, so daß ein

größeres Volumen an Lamellengraphit vorliegt, mit dem Effekt, daß die Wärmeleitfähigkeit höher ist als bei einem Gußeisen mit einer größeren Zugfestigkeit. Falls ein Gußeisen mit Lamellengraphit gleichzeitig eine hohe Wärmeleitfähigkeit und Festigkeit haben muß, wie zum Beispiel für moderne innenbelüftete Kfz.-Bremscheiben, so kann dies mit Legierungselementen erreicht werden [77, 78]. Aus den Unterschie-

den der Wärmeleitfähigkeiten zwischen GJS und GJL in *Bild 83* ist deutlich der Einfluß der Graphitform zu erkennen. Aufgrund der Kugelform und der Tatsache, daß die Kugeln getrennt voneinander angeordnet sind, ist die Wärmeleitfähigkeit von GJS geringer als die von GJL.

Die Wärmeleitfähigkeit von GJL fällt im Bereich von + 100 °C bis + 500 °C um etwa 1 W/(m \times K) für je 100 K Temperaturanstieg. Daraus kann man schließen, daß sie mit sinkender Temperatur um diesen Faktor zunimmt, da sich keine Gefügeänderungen abspielen.

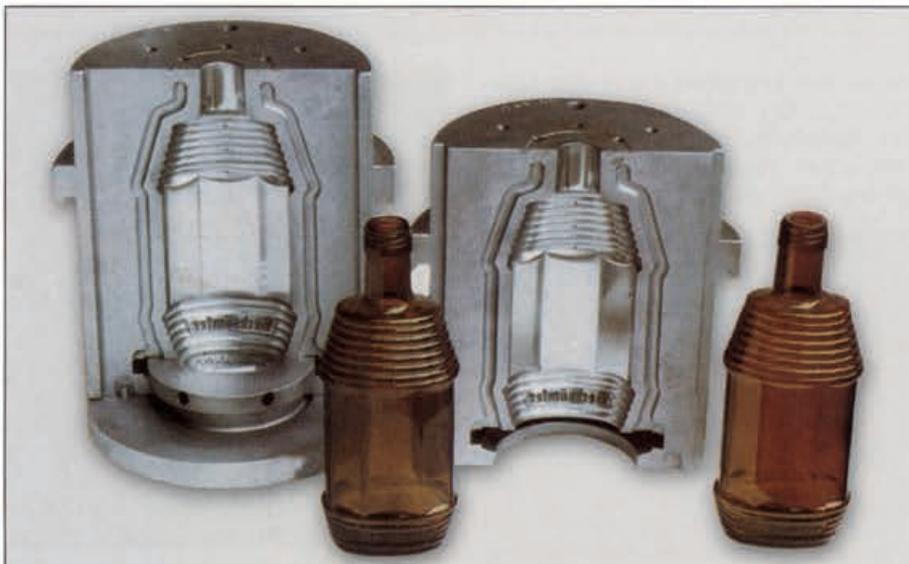


Bild 85: Form aus niedriglegiertem Gußeisen mit Lamellengraphit zur Herstellung von Glasflaschen

Spezifische Wärmekapazität

In reinen Fe-C-Systemen beeinflusst nur der Gehalt an Kohlenstoff [76] und nicht die Größe der Graphitlamellen oder -kugeln und deren Verteilung den Wärmeinhalt. Er nimmt bei Gußeisen mit Lamellengraphit mit steigender Zugfestigkeit zu, das heißt mit geringeren Kohlenstoffgehalten [72]. Dies widerspricht, sofern nur das reine System Fe-C betrachtet wird, der Theorie ($c_{Fe} = 452$ J/(kg \times K), $c_{Graphit} = 708$ J/(kg \times K) bei 20 °C) [79]. Es muß

aber berücksichtigt werden, daß bei technischen Fe-C-Si-Legierungen die geringeren Kohlenstoffgehalte zum Teil durch höhere Siliciumgehalte ($c_{Si} = 703 \text{ J}/(\text{kg} \times \text{K})$ bei $20 \text{ }^\circ\text{C}$ kompensiert werden, wodurch die zunehmende Wärmekapazität mit höherer Zugfestigkeit erklärt werden könnte. Bild 86 zeigt hierfür ein Beispiel mit zwei Sorten unterschiedlicher chemischer Zusammensetzung.

Magnetische Eigenschaften

Die Abhängigkeit der magnetischen Eigenschaften von der Zugfestigkeit, das heißt von den zugrunde liegenden chemischen Zusammensetzungen, ist

geringere Kohlenstoffgehalte eingestellt wird, ist hier deutlich dessen Einfluß zu erkennen. Mit höheren Kohlenstoffgehalten steigt die Zahl und sehr häufig auch die Größe der Graphitlamellen an, wobei die Lamellen mit ihrem Netzwerk wie eine Reihenschaltung von Widerständen wirken. Dabei wird durch grobe Graphitlamellen der elektrische Widerstand stärker erhöht als durch feine. Im Hinblick auf die graphitisierende Wirkung des Siliciums haben größere Siliciumgehalte ebenfalls eine Erhöhung des spezifischen elektrischen Widerstandes zur Folge. Die gleiche Wirkung haben Legierungselemente, die zur Bildung von Mischkristallen führen; hierbei werden Fremdatome in das Eisengitter eingelagert.

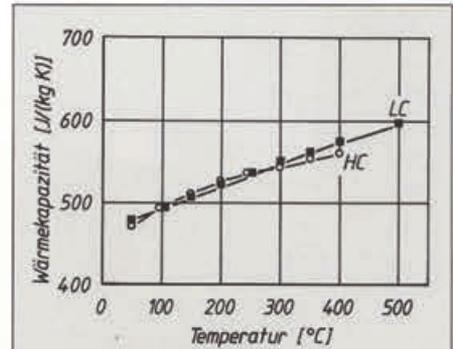


Bild 86: Mittlere spezifische Wärmekapazität von zwei Sorten Gußeisen mit Lamellengraphit in Abhängigkeit von der Temperatur [75, 76]; chemische Zusammensetzung: LC = GJL nach Tabelle 21, HC [Masse-%]: 3,34 C, 1,81 Si, 1,26 Mn, 0,17 P, 0,077 S

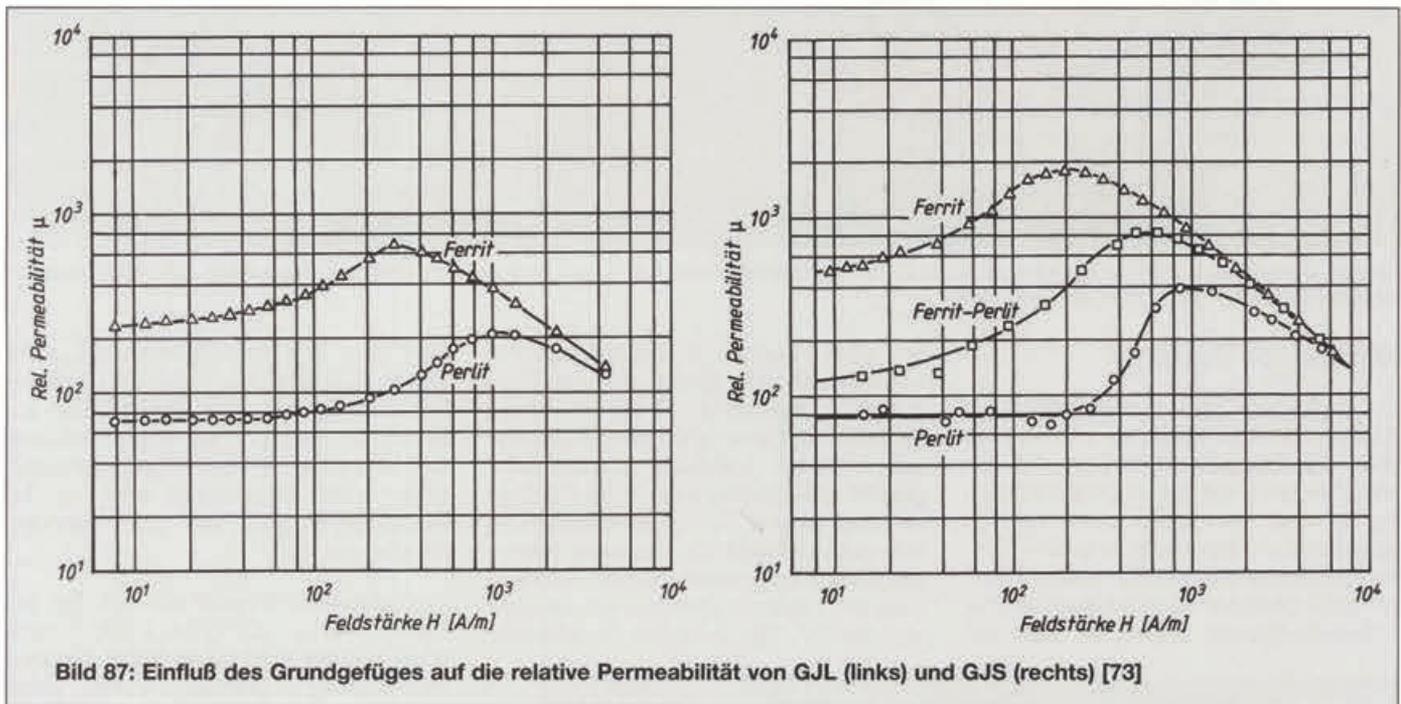


Bild 87: Einfluß des Grundgefüges auf die relative Permeabilität von GJL (links) und GJS (rechts) [73]

nicht besonders ausgeprägt, wie den Angaben in Tabelle 20 zu entnehmen ist; die dort genannten Werte gelten aber nur für ein perlitische Grundgefüge. Mit dem Übergang zu einer ferritischen Matrix ändern sich die magnetischen Eigenschaften jedoch sehr deutlich [73, 75], wie am Beispiel der relativen Permeabilität in Bild 87 gezeigt wird. Perlitische Gußeisensorten sind als magnetisch hart, ferritische als magnetisch weich einzuordnen.

Elektrischer Widerstand

Der spezifische elektrische Widerstand nimmt mit der Zugfestigkeit ab. Da, wie bereits erwähnt, Gußeisen mit Lamellengraphit höherer Zugfestigkeit über

Wegen der kugligen Form des Graphits im GJS und des nicht vorhandenen Graphitnetzwerkes ist dessen elektrischer Widerstand niedriger als der des GJL, wie Bild 88 verdeutlicht.

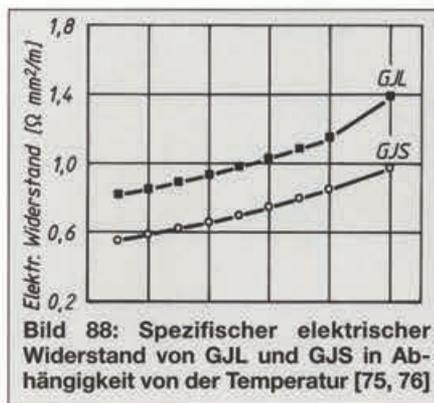


Bild 88: Spezifischer elektrischer Widerstand von GJL und GJS in Abhängigkeit von der Temperatur [75, 76]

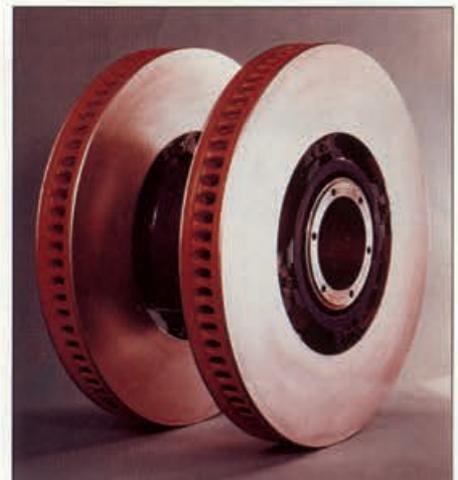


Bild 89: Scheibenbremse für den Hochgeschwindigkeitszug TGV mit Bremsringen aus GJL-250 (640 mm Ø)

Verschleißbeständigkeit

Die Haltbarkeit vieler beweglicher Bauteile von Maschinen und Anlagen oder solcher Bauteile, die mit beweglichen Elementen in direktem Kontakt stehen, hängt vom Verschleißwiderstand der verwendeten Werkstoffe oder einer entsprechenden Oberflächenbehandlung ab. Unter Verschleiß versteht man die mechanische Abtragung kleinster Teilchen von der Oberfläche eines Werkstückes durch Kontakt mit einem anderen relativ dazu bewegten Material [81], wie das allgemeingültige Schema eines Verschleißvorganges nach DIN 50320 zeigt. Es gibt eine Vielzahl von Verschleißarten, die zusammen mit den vielen Einflußgrößen wie Schmierung, Temperatur, Druck, Oberflächenglätte, relative Geschwindigkeit der Bewegung, Fremdteilchen oder korrosive Medien zwischen den Verschleißpartnern und die Materialzusammensetzung selbst sehr komplexe Zusammenhänge bilden.

Schon der Aufbau einer dem Verschleiß ausgesetzten metallischen Oberfläche ist recht kompliziert. Gleiches gilt für den Verschleißfortschritt, der je nach den Randbedingungen degressiv, progressiv oder nahezu gleichbleibend (quasistationär) sein kann [82].

Auch das Bild der verschlissenen Oberfläche ist nicht einheitlich [83].

Bei schlagartiger oder stark wechselnder Beanspruchung kommt es zu Oberflächenermüdungen oder -zerrütungen („pittings“, Ausschaltungen, Ausbrüchen) als Folge hoher Druckspannungen. Das Mitwirken harter Verschleißprodukte oder Mineralstoffe zeigt sich in Furchungen (Abrasion). Starke lokale Überhitzung führt zum Sintern oder Verschweißen der Verschleißpartner oder von Verschleißprodukten mit einem der Partner (Adhäsion). Beim Mitwirken von Sauerstoff und lokaler Überhitzung ergibt sich das Bild einer durch anhaftende Oxidationsprodukte gekennzeichneten Verschleißoberfläche (Tribooxidation).

Der Verschleiß hängt teilweise stärker von den Beanspruchungsbedingungen als von den Eigenschaften der Verschleißpartner ab [84]. So ist bei niedriger Belastung zunächst mit einem geringen, der Last proportionalen Verschleiß zu rechnen („Tiefelage“). Beim Überschreiten einer bestimmten Grenze steigt der Verschleiß sprunghaft auf ein wesentlich höheres Niveau infolge Bildung harter oxidischer Verschleißprodukte, die sich als „Zwischenstoff“ maßgebend am Abrieb beteiligen. Und auch der Verschleiß in der „Hochlage“ ist wiederum der Belastung proportional, nur eben auf wesentlich höherem Niveau. Schließlich kann es bei noch höheren Lasten zu einem „Poliereffekt“

kommen. Die Oberfläche wird – zumindest stellenweise – glatt und glänzend, die Verschleißrate sinkt ab, um anschließend erneut wieder anzusteigen.

Graphithaltige Gußeisenwerkstoffe – vor allem Gußeisen mit Lamellengraphit GJL – besitzen unter den Bedingungen eines geschmierten Gleitverschleißes einen natürlichen Vorteil, da der Graphit einen festen Schmierstoff darstellt. Und selbst wenn der an der Oberfläche liegende Graphit während des Einsatzes verbraucht werden sollte, bilden die Hohlräume, in denen sich zunächst Graphit befunden hat, Schmierstoffreservoirs („Taschen“). Das führt dazu, daß GJL zum universell eingesetzten Werkstoff für Automobilkomponenten geworden ist, zum Beispiel Zylinderlaufbüchsen, Zylinderlaufringe, Kolbenringe. Auch im allgemeinen Maschinenbau wird GJL da eingesetzt, wo an hin- und her- oder kontinuierlich gleitenden Oberflächen nur eine Minimalschmierung aufrecht erhalten werden kann, wie zum Beispiel an Führungsbahnen von Werkzeugmaschinen oder Zylindern für Kolbenverdichter [85].

Bei kombinierten Wälz- und Gleitbeanspruchungen, wie sie zum Beispiel bei Zahnrädern auftreten, hat GJL den Vorteil eines niedrigen E-Moduls, wodurch das Ausmaß von Kontaktspan-

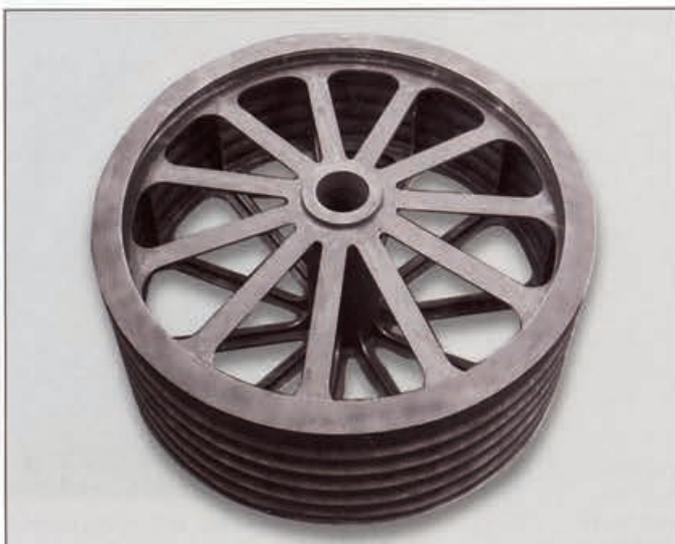


Bild 90: Abzugscheibe für eine Verseilmaschine, Werkstoff: GJL-250, \varnothing 5150 mm



Bild 91: Kettenrad aus GJL-250 für eine Druckmaschine, Gewicht: 15 kg

nungs-Konzentrationen durch Bearbeitungs- oder Passungsfehler niedriger bleibt.

Die hohe Wärmeleitfähigkeit, der niedrige E-Modul und das Vorhandensein von Graphit sorgen dafür, daß GJL besonders widerstandsfähig gegen Versagen in solchen Fällen ist, in denen durch starke lokale Erwärmungen hohe Temperaturen erreicht werden können. Herausragende Beispiele sind Kupplungsteile, Bremsstrommeln, -scheiben, -klötze. Häufig kommt es schon nach kurzer Zeit zum Versagen der Oberflächen, wenn andere Werkstoffe verwendet werden.

Ein unmittelbarer Zusammenhang zwischen dem Verschleißwiderstand bei gleitender Reibung und anderen mechanischen Eigenschaften besteht nicht. Vielfach wird die Härte zur Beurteilung des Verschleißverhaltens verwendet, jedoch gestattet sie keine zuverlässige Voraussage des Verschleißwiderstandes. Als allgemeine Regel gilt, daß GJL oberhalb 200 HB gute Verschleiß Eigenschaften besitzt (Bild 92). Je nach Beanspruchung haben sich in der Praxis Härteunterschieden der beiden Verschleißpartner von 50 bis 150 HB bewährt. Dabei sollte stets das besser austauschbare beziehungsweise kostengünstigere Funktionselement den geringeren Verschleißwiderstand aufweisen.

Von besonderer Bedeutung für das Verschleißverhalten ist die Gefügeausbildung. Von den Graphiteinlagerungen geht vor allem ein positiver Einfluß auf die Gleit- und Notlaufeigenschaften aus. Ein gutes Verschleißverhalten ist nach [81] bei einer relativ feinen Graphitausbildung und einer feinperlitischer Grundmasse zu erwarten, die

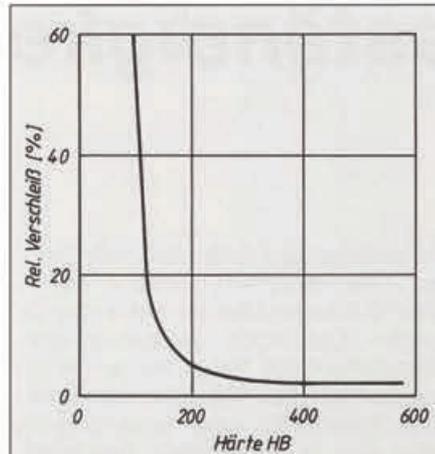


Bild 92: Die Brinellhärte übt einen starken Einfluß auf den Gleitverschleiß aus [86]

auch in geringer Menge feinverteilte Carbide enthalten kann. Nach [87] ist von den möglichen Einflüssen chemische Zusammensetzung, Härte, E-Modul und Graphitausbildung lediglich der Einfluß des Graphits signifikant. Danach sind Lamellenlängen von 100 bis 250 μm und -breiten von 2 bis 3 μm ideal. Bei zu feinem Graphit ergibt sich im Gegensatz zu [82], aber verständlich wegen plastischer Verformung der Grundmasse und des Zuschmierens der Graphiteinschlüsse, leicht die verschleißfördernde „Blechmantelbildung“.

Fressen ist die folgenschwerste Verschleißerscheinung beim Gleiten von Metall auf Metall [88]. Dazu gehören die Bildung von Aufbauschichten und das Verschweißen der Reibpartner beim Aufreißen des Schmierfilms. Aufgrund seiner hohen Wärmeleitfähigkeit hat grober Graphit einen besonders günstigen Einfluß. Voraussetzung dafür



Bild 93 Kettennuß für einen Kettenförderer, Werkstoff: GJL-300, Gewicht: 121 kg

ist ein feinstreifiges perlitisches Grundgefüge, dessen Härte durch entsprechendes Legieren verbessert werden kann. Nach [89] bilden sich Aufbauschichten auch als Folge von Rissen an den Graphitlamellen und Mikroporen, die durch Verschleißprodukte angefüllt werden.

Von den Begleitelementen des Gußeisens ist Phosphor für die Verschleißbeständigkeit besonders interessant. Es bildet einen eigenen Gefügebestandteil, das Phosphideutektikum, dessen Härte diejenige der ferritischen und perlitischen Grundmasse weit übertrifft. Dieses Phosphideutektikum liegt in netzförmiger Anordnung vor, ähnlich wie es von Lagermetallen her bekannt ist, und erhöht den Verschleißwiderstand beträchtlich (Bild 94).

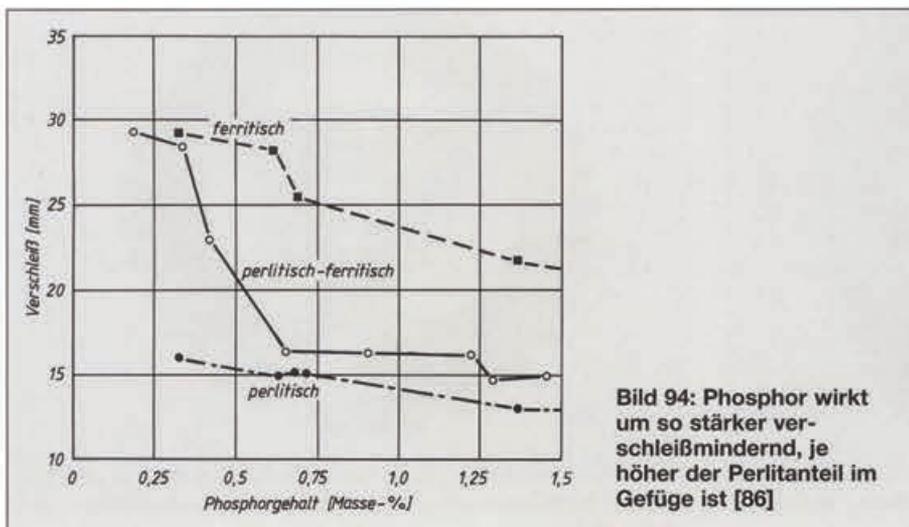


Bild 94: Phosphor wirkt um so stärker verschleißmindernd, je höher der Perlitanteil im Gefüge ist [86]

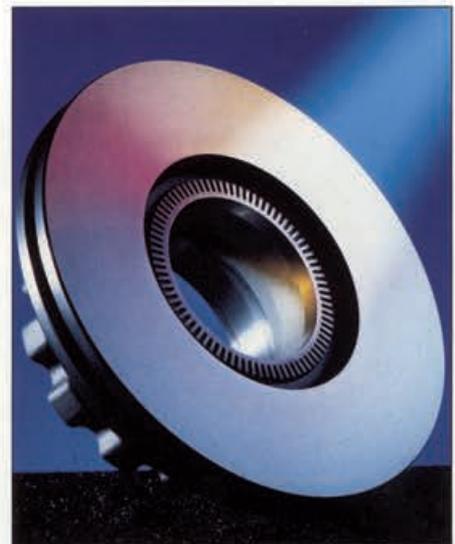


Bild 95: Bremscheibe mit integriertem ABS-Sensorring für einen Leicht-Lkw, Werkstoff: hochgekohtes niedriglegiertes GJL-150

Einsatz von C-Techniken

In den vergangenen Jahren haben sich die Randbedingungen für die Entwicklung und Produktion vieler Erzeugnisse entscheidend verändert:

- Der Lebenszyklus der Produkte wurde deutlich verkürzt. Nachfolgeprodukte müssen früher und schneller bei gleichzeitig erhöhter Sicherheit der Erstfertigung entwickelt werden.
- Der globale Wettbewerb und der drastische Preisverfall bei den Transportkosten sorgen dafür, daß nun auch diejenigen Länder für die Produktion und Lieferung in Frage kommen, die bisher „außen vor“ geblieben waren.
- Die politischen Veränderungen, insbesondere im Osten, haben dafür gesorgt, daß Arbeitsgänge mit einem hohen Lohnkostenanteil in Deutschland kaum noch wirtschaftlich darstellbar sind.
- Die wirtschaftlichen Einbrüche am Anfang der 90er Jahre bewirkten einen starken Personalabbau insbesondere in den Entwicklungsabteilungen (Stichwort „Outsourcing“). Die schlechten Aussichten in diesem Berufsfeld haben dazu geführt, daß nicht ausreichend Studenten „nachwachsen“.

Hinzu kommt, daß auch die Firmen die Ausbildung von Nachwuchskräften vernachlässigt haben. Daher ist bei einer erhöhten Nachfrage der Bedarf nicht leicht wieder abzudecken. Daraus resultiert die „Green-Card-Offensive“, die speziell für die IT-Branche gedacht ist, aber vermutlich auch auf andere Ingenieur Tätigkeiten ausgedehnt werden muß. Als Folge hiervon werden Entwicklungstätigkeiten zunehmend von Zulieferern und externen Dienstleistern übernommen.

Es besteht der Zwang, neue Produkte schneller als früher unter hohem Kostendruck zu entwickeln. Dieses ehrgeizige Ziel ist nur dann erreichbar, wenn völlig neue Formen der Kooperation eingeführt und angewendet werden und hierzu modernste Methoden zum Einsatz kommen.

Der Zulieferer muß als Entwicklungspartner angesehen werden. Eine

Zusammenarbeit beginnt zweckmäßigerweise nicht erst dann, wenn die Produkte fertig konstruiert sind. Der in der Entwicklungsphase festgelegte Kostenanteil liegt bei 70 bis 80 %. Das zeigt deutlich, daß in dieser Phase auch das größte Einsparpotential liegt.

CAD-gestütztes Konstruieren

Am Anfang der Entwicklung steht die Konstruktion. In diesem Stadium sollen möglichst viele Varianten auf ihre Verwertbarkeit getestet werden, um das funktionale und preisliche Optimum zu finden. Eine effektive Art zu konstruieren ist daher von eminenter Bedeutung.

Der vollständige Nutzen des CAD erschließt sich erst, wenn 3D-Daten erstellt sind – die Realität ist schließlich dreidimensional. Damit ergeben sich vielfältige Anwendungsmöglichkeiten:

- Virtuelles Visualisieren des Bauteils,
- Festlegen der Arbeitsfolge beim Aufbauen der Form (Kerne, Formteile) in der Gießerei,
- Volumina und Gewicht von Gußstück, Kernen und Form können ermittelt werden,
- drastisch können die Probleme bei der Montage und Fertigung, die bei komplexen Bauteilen meistens erst an dreidimensionalen Modellen befriedigend zu beurteilen sind, verringert werden.

Die möglichst durchgängige Nutzung von 3D-CAD-Daten bringt eine erhebliche Zeitersparnis, denn diese Daten werden an mehreren Stellen benötigt. Durch den Zugriff auf ein einziges Modell sinkt auch die Fehlerwahrscheinlichkeit, vorausgesetzt, daß die einmalige Modellerstellung besonders sorgfältig durchgeführt wird, denn sonst ziehen sich vorhandene Fehler konsequent durch alle Prozesse. – Die auf der Bauteilgeometrie basierenden Nachfolgeprozesse verwenden weitestgehend das gleiche CAD-Modell und können daher parallel abgearbeitet werden.

FEM-Berechnungen

Zentrale Fragen des Konstrukteurs beim Entwurf einer Neukonstruktion sind:

- Wird das Bauteil den Belastungen standhalten?
- Sind alle kritischen Stellen ermittelt und berücksichtigt?
- Ist das Bauteil in einigen Bereichen überdimensioniert, was zu unnötigem Werkstoffaufwand und damit Kosten führen würde?
- Sind die im Betrieb auftretenden Verformungen tolerierbar?

Eine Antwort auf all diese Fragen allein mit Erfahrung oder analytischen Mitteln zu geben ist schwierig und teilweise gar unmöglich. Analysen eines Bauteils mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode (FEM) können hier wertvolle Unterstützung leisten. Das Bauteil wird dabei im Rechner als Simulationsmodell abgebildet und mit den realen Belastungen beaufschlagt. Das Ergebnis sind die auftretenden Spannungen und Verformungen des Bauteils unter Last; auch ist es möglich, weitere Ergebnisse zu erhalten, zum Beispiel Temperaturfelder oder Eigenfrequenzen. Durch geeignete Interpretation der Ergebnisse kann auf diese Weise das Bauteil optimiert und dabei die wichtigsten Restriktionen beachtet werden:

- Einhalten des vorgegebenen Bau- raumes,
- Unterschreiten einer maximalen Verformung,
- Einhalten des vorgegebenen Höchstgewichts,
- Erreichen des Kostenzieles.

Der Nutzen durch Anwendung der FEM ist enorm:

- Aufdecken versteckter Schwachstellen,
- Steifigkeitsgewinne in kritischen Bereichen von 30 bis 50 %,
- weitere Gewichtseinsparungen an bereits als „Leichtbaukonstruktionen“ geltenden Entwürfen,

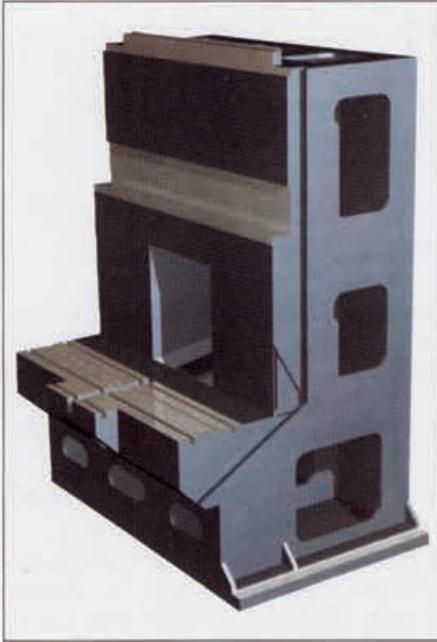


Bild 96: CAD-Modell eines Maschinenständers, erstellt nach den 3D-Daten der ursprünglichen Konstruktion

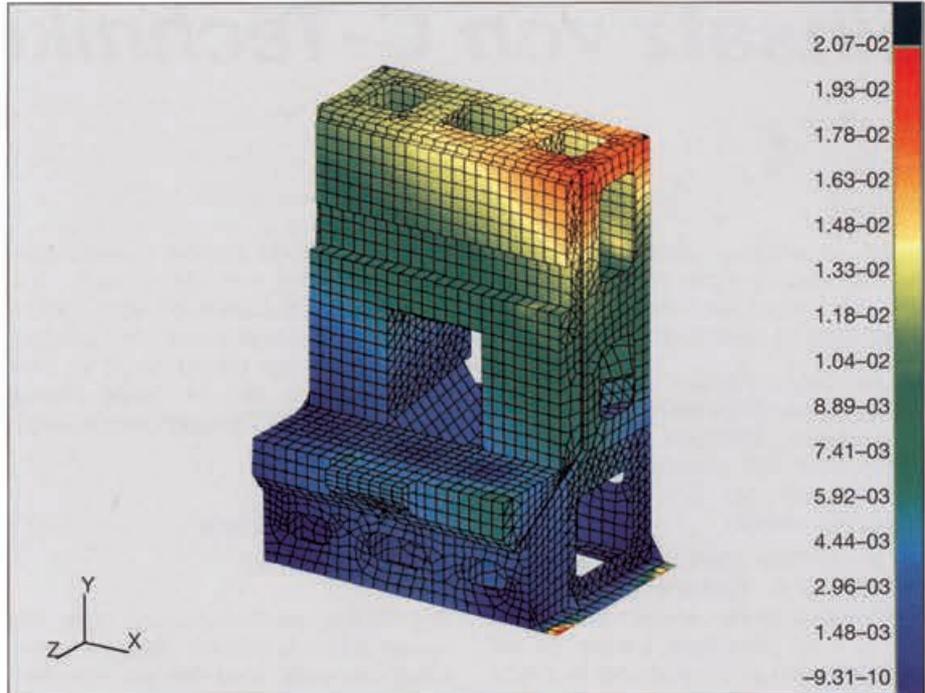


Bild 97: Maschinenständer nach Bild S1 im FEM-Netz, unzulässig hohe Verformungen

- verringerte Kosten durch vereinfachte Fertigung,
- Kosteneinsparung durch vereinfachte Montage (Integration von Anschraubteilen).

Die Finite-Elemente-Methode ist ein hervorragendes Hilfsmittel (!) zum Optimieren einer Konstruktion. Werte, die früher nur abgeschätzt werden

konnten, wie zum Beispiel die Verformung unter Betriebsbedingungen oder die Spannungen im Werkstückinneren, können nun neutral bewertet werden. Die großen konstruktiven Freiheiten beim Fertigungsverfahren „Gießen“ erlauben es, daß die Kontur des Bauteils exakt an die Anforderungen angepaßt werden kann. Es wird ein homogener Kraftfluß im Bauteil erreicht,

hohe Spannungsgradienten würden die Belastbarkeit erheblich senken. Am Beispiel eines Maschinenständers soll der Arbeitsablauf kurz erläutert werden. Mit den ursprünglichen 3D-CAD-Daten wurde ein CAD-Modell erstellt (Bild 96) und mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode analysiert. Es wurden unzulässig große Verformungen festgestellt (Bild 97). Ver-

Bild 98: Um mehr als 50 % kleinere und daher zulässige Verformung durch Optimierung

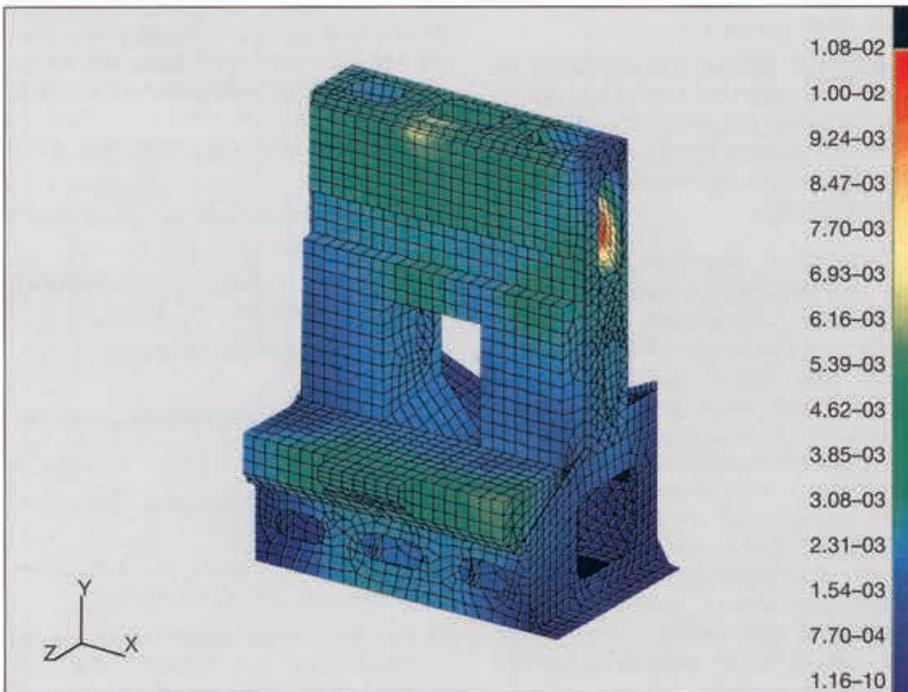


Bild 99: Abguß des nach Bild 98 optimierten Maschinenständers; Abmessungen: 1425 x 1160 x 1990 mm, Gewicht: 2460 kg



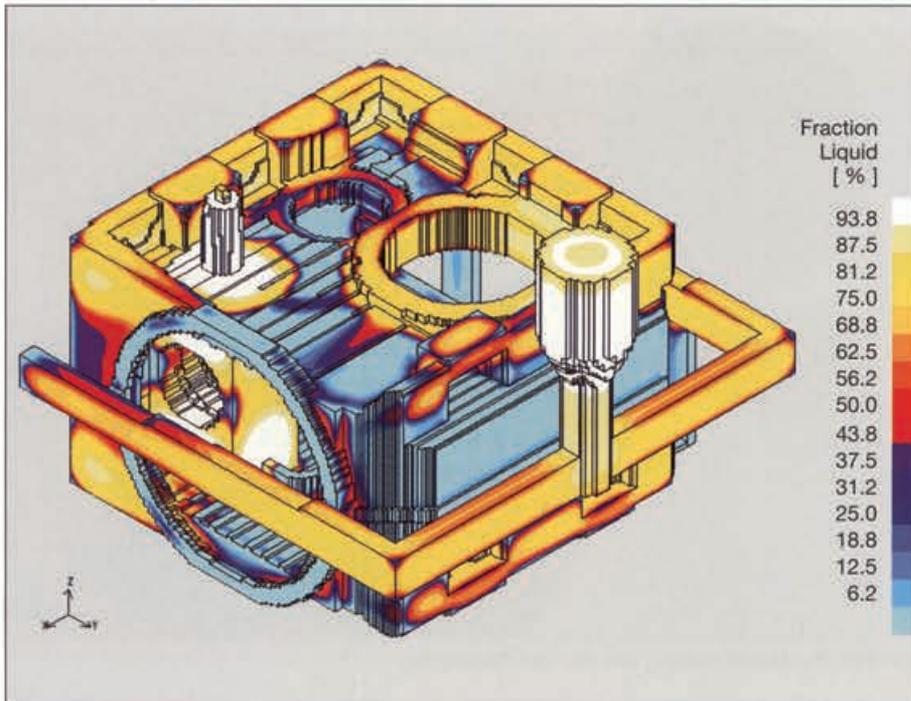


Bild 100: Erstarrungsverhalten eines Getriebegehäuses

schiedene Änderungen führten zu einer optimierten Konstruktion (Bild 98) mit zulässiger maximaler Verformung. Gleichzeitig konnten das Gewicht um 10 % und die Herstellkosten um 18 % gesenkt werden.

Erstarrungssimulation

Das Konstruieren mit CAD dient der schnellen, übersichtlichen und sicheren Geometrieerzeugung. Mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode wird geprüft, ob das Bauteil die auftretenden Lasten erträgt oder ob die auftretenden Verformungen im zulässigen Bereich liegen. Nachdem ein ausreichend dimensioniertes Bauteil vorliegt ist der nächste Schritt, die Herstellbarkeit dieses Bauteils als Gußstück im Rechner zu simulieren. Die Berechnung des Gießprozesses umfaßt:

- Formfüllung,
- Erstarrung des flüssigen Eisens,
- Gefügeumwandlungen im erstarrten Zustand.

Als Ergebnisse der Simulation sind zu nennen die Strömungs- und Temperaturverteilung während der Formfüllung, potentielle Ungängen, Erstarrungsdauer des Gußstückes, Gefügeausbildung und mechanische Eigenschaften im Gußstück. Mit Hilfe dieser Ergebnisse läßt sich der Gießprozeß im Rechner

optimieren. Falls Problemstellen angezeigt werden, so können das Speise- und Anschnittsystem verändert und die Auswirkungen nach einem erneuten Rechenlauf objektiv beurteilt werden.

Die gießtechnische Simulation erfordert aufgrund der verwendeten Finite-Differenzen-Methode und der vielen zu berücksichtigenden Parameter (Temperatur, Strömungstensor und Zeit) extrem hohe Rechnerleistungen zur Bewältigung der anfallenden Datenmengen.

Frühere Versionen der Berechnungs-Software gingen von dem Zustand aus, daß eine mit Schmelze gefüllte Gießform an jeder Stelle die gleiche Temperatur hat, was die Basis für die Berechnung von Abkühlung und Erstarrung war. Bei der Weiterentwicklung der Simulationsprogramme wurde dazu übergegangen, auch den Formfüllprozeß zu berücksichtigen, da die Temperaturverteilung in einer gefüllten Form so unterschiedlich sein kann, daß schon während des Gießens einzelne Gußstückpartien erstarrt sind. Diese Vorgehensweise hat zur Folge, daß zur Berechnung des Wärmetransportes auch noch komplexe strömungsmechanische Gleichungen bei veränderlicher Temperatur in die Simulation eingehen und der damit verbundene Rechenaufwand drastisch ansteigt.

Die Formfüll- und Erstarrungssimulationsprogramme sind aufgrund der

heute zur Verfügung stehenden Rechner-technologie und der berücksichtigten Randbedingungen des Gießprozesses in der Lage, in relativ kurzer Zeit ein hervorragendes Simulationsergebnis zu liefern. Bei der verwendeten Software werden als Datenbasis nur physikalische und mechanisch-technologische Kennwerte der jeweils verwendeten Werkstoffe, Formstoffe und Formhilfsstoffe verwendet, so daß die Simulationsergebnisse in erster Linie von den zur Verfügung stehenden Datensätzen abhängig sind.

Bild 100 zeigt das Erstarrungsverhalten eines Gußstückes. Hellblau sind die zuerst erstarrenden Bereiche wiedergegeben, die Farbe Weiß kennzeichnet die heißesten Bereiche. So können die Wärmezentren des Gußstückes schnell erkannt werden. Diese Aussagen sind für den Gießer sehr hilfreich bei der Auslegung des Anschnitt- und Speisesystems. Durch die Kenntnis der beim Gießen ablaufenden Prozesse können die kritischen Bereiche eines Gußstückes sehr genau lokalisiert werden. Das bietet die Möglichkeit, seine Qualität sehr viel effektiver als bisher zu beurteilen. Unter Zuhilfenahme der Simulationsergebnisse kann mit verringertem Aufwand eine wesentlich höhere Prüfqualität gewährleistet werden. Bei Kenntnis der kritischen Bereiche kann an diesen gezielt geprüft werden. Wenn sie fehlerlos sind, ist die Qualität des gesamten Gußstückes in Ordnung. Voraussetzung hierfür ist selbstverständlich die Prozeßkontrolle und die zuverlässige Beherrschung des Gießprozesses. – Sofern die kritischen Bereiche eines Bauteils nicht bekannt sind, muß es komplett geprüft werden. Aber auch dann besteht keine Sicherheit bezüglich der Problemstellenerkennung.

Bearbeitungssimulation

Der Aufwand für die Bearbeitung beeinflusst erheblich die Kosten des einbaufertigen Bauteils. Es ist daher von großem Nutzen, schon frühzeitig die für die vorgesehene Bearbeitung optimal geeignete Maschine auszuwählen. Dazu ist es notwendig zu prüfen, ob die zu bearbeitenden Flächen mit den Verfahrenswegen der jeweiligen Maschine sowie mit deren Störkanten verträglich sind.

Für die Simulation werden den im Rechner gespeicherten dreidimensionalen Abbildungen der vorhandenen

Bearbeitungsmaschinen die in 3D-CAD erstellten Werkstückgeometrien hinzugeladen. Die Auswahl der geeigneten Werkzeuge erfolgt direkt am Bildschirm im Dialog. Durch virtuelles Verfahren der Maschine in den entsprechenden Achsen wird ermittelt, ob die geplante Bearbeitung auf dieser Maschine sinnvoll und machbar ist. Sollte dies nicht möglich sein, dann kann das Werkstück auf einer anderen Maschine in einer weiteren Simulation getestet werden.

Die spätere reale Bearbeitung auf der letztendlich ausgewählten Maschine wird vor dem Start der Fertigung zusätzlich virtuell überprüft. Hierbei können sehr leicht Fehler in der Aufspannsituation und bei falschem Festlegen des Bearbeitungsablaufs aufgedeckt werden. Auch wird eine Kollisionkontrolle durchgeführt.

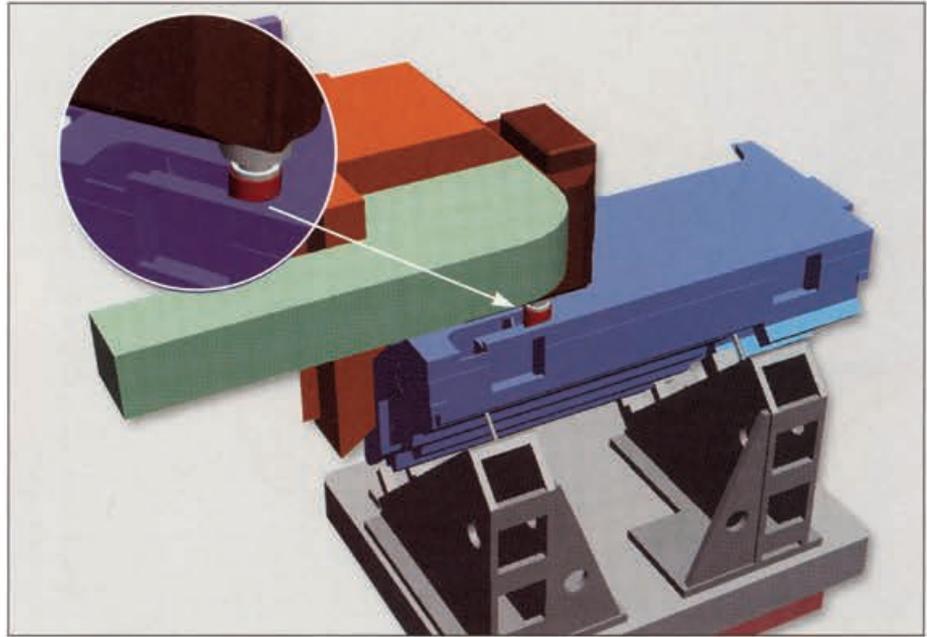


Bild 101: Fehlererkennung bei der NC-Simulation

Bild 101 läßt erkennen, daß der Fräser durch falsche Koordinatenangabe bei der CNC-Programmerstellung den Boden des Werkstückes durchdringt und es vermutlich ein Ausschußteil geworden wäre. Durch die Simulation konnte der Fehler rechtzeitig erkannt werden. – Bei der realen Bearbeitung sind solche Fehler schwierig zu erkennen, wenn die Programmierung um genau 50 mm neben der Realität liegt. So „glatte“ Werte sind unverdächtig. (Leidvolle Erfahrung aus der eigenen Vergangenheit!)

Die rechnerische Simulation erlaubt ferner zu prüfen, ob die Zugänglichkeit an einer bestimmten Stelle gegeben ist. Anhand von Zeichnungen ist so etwas, bei entsprechend komplexer

Geometrie, schwierig mit letzter Gewißheit zu erkennen. Auch für den Bereich der mechanischen Bearbeitung zeigt sich also, daß die Simulation der Vorgänge im Rechner zu gesteigerter Sicherheit, verringerten Einfahrzeiten und somit zu kürzeren Durchlaufzeiten und geringeren Kosten führt.

Rapid-Prototyping

Die Forderungen nach kürzeren Produktentwicklungszeiten und früherer Marktpräsenz sowie wachsende Qualitätsanforderungen führen zu zuneh-

mendem Zeit- und Kostendruck und verlangen neue Lösungsansätze. Die schnelle Marktpräsenz ist häufig von entscheidender Bedeutung für den Produkterfolg.

Prototypen unterstützen den Entwicklungsprozeß und dienen zur Überprüfung von Design und Funktion in einer frühen Entwicklungsphase. Die schnelle Verfügbarkeit von physischen Modellen trägt zur Verkürzung der Planungsphasen und zur Optimierung der Produkteigenschaften bei. Hier kommt den neuen Rapid-Prototyping (RP)-Technologien entscheidende Bedeutung zu. Unter RP versteht man solche Verfahren, mit denen Modelle, Formen und/oder Kerne schichtweise direkt aus dem 3D-CAD-Geometriedatensatz ohne Zerspanungsvorgänge aufgebaut werden. Häufig angewendete Verfahren sind beispielsweise die Stereolithographie, das Lasersintern (*Bild 102*), Fused Deposition Modeling, Laminated Object Manufacturing, Direct Shell Production Casting und 3D-Plotting.



Bild 102: Mit dem Lasersintern erzeugte Form und Kern sowie danach erstelltes Gußstück

Wärmebehandlung

Im allgemeinen werden Gußteile aus Gußeisen mit Lamellengraphit nicht wärmebehandelt, sondern sie erhalten ihre Eigenschaften bereits im Gußzustand. In manchen Fällen ist jedoch eine der folgenden Wärmebehandlungen zur Optimierung der Verarbeitungs- oder Gebrauchseigenschaften angebracht:

- Spannungsarmglühen zum Vermindern der Eigenspannungen
- Weichglühen (Ferritglühen) zum Verringern der Härte und damit Verbessern der Zerspanbarkeit

- Perlitglühen zum Erhöhen der Festigkeit
- Härten zum Verbessern des Verschleißwiderstandes
- Vergüten durch Anlassen nach dem Härten, um bei nahezu gleichbleibender Härte die Festigkeit zu erhöhen.

Tabelle 24 gibt eine Übersicht der wichtigsten Wärmebehandlungsverfahren für Gußeisen mit Lamellengraphit.

Die Grundlagen für jede Wärmebehandlung – mit Ausnahme des Spannungsarmglühens – ergeben sich aus dem Eisen-Kohlenstoff-Diagramm (Bild 7). Ferrit vermag praktisch keinen Kohlenstoff zu lösen, bei Austenit nimmt die Löslichkeit für Kohlenstoff mit steigender Temperatur von 0,8 auf 2% zu. Dies ist neben den beiden unterschiedlichen Erscheinungsformen von Kohlenstoff im Gefüge – kristallin als Graphit oder chemisch gebunden als Eisencarbid (Fe_3C , Zementit) – die Voraussetzung, mit einer Wärmebehandlung die mechanischen Eigen-

Tabelle 24: Übersicht der wichtigsten Wärmebehandlungsverfahren für Bauteile aus Gußeisen mit Lamellengraphit

Wärmebehandlungsverfahren	Angestrebtes Ziel	Gußeisensorte	Glühtemperatur	Zeit ¹⁾	Abkühlen
Spannungsarmglühen	Beseitigen von Spannungen	unlegiert und niedriglegiert	500 bis 550 °C 560 bis 600 °C	1 h + 1 h je 25 mm Wanddicke	Ofenabkühlung 40 K/h bis 300 °C (bis 100 °C für komplizierte Teile)
Weichglühen ²⁾ bei niedriger Temperatur	Ferritisches Gefüge, beste Zerspanbarkeit	unlegiert und niedriglegiert	700 bis 760 °C	45 min bis 1 h je 25 mm Wanddicke	Ofenabkühlung 55 K/h zwischen 540 und 300 °C
Weichglühen ²⁾ bei mittlerer Temperatur	Ferritisches Gefüge, beste Zerspanbarkeit	niedriglegiert	790 bis 900 °C	> 45 min je 25 mm Wanddicke	Ofenabkühlung von Glühtemperatur bis 300 °C
Weichglühen ²⁾ bei hoher Temperatur	Ferritisches Gefüge, beste Zerspanbarkeit	meliertes und weißes Gußeisen	900 bis 955 °C	1 h bis 3 h + 1 h je 25 mm Wanddicke	Ofenabkühlung von Glühtemperatur bis 300 °C
Weichglühen bei hoher Temperatur	Beseitigen von Carbideinschlüssen unter Beibehaltung maximaler Festigkeit und Härte	meliertes und weißes Gußeisen	900 bis 955 °C	1 h bis 3 h + 1 h je 25 mm Wanddicke ³⁾	Lüftabkühlung bis 540 °C, dann Ofenabkühlung bis 300 °C
Perlitglühen	Perlitisches Gefüge, hohe Festigkeit	alle Sorten	850 bis 955 °C	1 h bis 3 h + 1 h je 25 mm Wanddicke	Luftabkühlung bis 540 °C, dann Ofenabkühlung bis 300 °C
Härten	Martensitisches Gefüge höchster Härte	alle Sorten	800 bis 955 °C	1 h + 1 h je 25 mm Wanddicke	Luft- oder Flüssigkeitsabschreckung auf < 200 °C
Vergüten (Härten mit nachfolgendem Anlassen)	Vermindern der Sprödigkeit des Martensits	alle Sorten	Anlaßtemperatur: 150 bis 650 °C	1 h je 25 mm Wanddicke	Luft- oder Ofenabkühlung

¹⁾ Kürzere Zeiten lassen sich bei Glühöfen mit Strahlungsbeheizung erreichen.

²⁾ Auch Ferritglühen, Ferritisieren oder Graphitisieren genannt

³⁾ Die Carbide können häufig bereits in kürzerer Zeit abgebaut werden.

schaften des Werkstoffs beziehungsweise des Werkstücks gezielt beeinflussen zu können.

Bild 96 zeigt schematisch den Temperaturverlauf für die Wärmebehandlungsarten in Abhängigkeit von der Zeit. Durch Legierungselemente wird die Wirkung einer Wärmebehandlung meist erhöht und ist in der Regel einfacher durchzuführen, obwohl der jeweils notwendige Temperaturbereich höher ist als bei unlegierten Gußeisenwerkstoffen.

Den Einfluß von Silicium als wichtigstem Begleit- beziehungsweise Legierungselement auf die sogenannte eutektoide Temperatur (A_{C1}) zeigt Bild 98, bei der Austenit in Perlit oder in Ferrit und Graphit umwandelt (Linie PSK in Bild 7); wegen ihrer Bedeutung für die Umwandlungsvorgänge wird diese Temperatur auch als „kritische Temperatur“ bezeichnet. Durch steigende Siliciumgehalte wird ein Temperaturintervall mit oberer und unterer kritischer Temperatur ausgebildet, gleichzeitig wird dieser Bereich zu höheren Temperaturen hin verschoben.

Spannungsarmglühen

Ein Gußstück völlig ohne innere Spannungen herzustellen ist praktisch unmöglich. Im Vergleich zu anderen Eisengußwerkstoffen sind sie bei graphithaltigen Gußeisen jedoch am geringsten, da sie aufgrund der Graphitausscheidungen während und nach dem Erstarren nur wenig schwinden. Außerdem wirken sich der niedrige E-Modul und die hohe Wärmeleitfähigkeit in dieser Hinsicht ebenfalls günstig aus. Eine weitgehende Freiheit von inneren Spannungen läßt größere äußere Beanspruchungen der Gußstücke zu und verringert den eventuell beim Bearbeiten auftretenden Verzug.

Die Größe der Spannungen innerhalb eines Gußstücks ist abhängig von seiner Konstruktion und den Abmessungen, insbesondere von Wanddickenunterschieden, der Gieß- und Anschnittechnik, der Gießtemperatur sowie von der chemischen Zusammensetzung, vom Graphitgehalt und den mechanischen und physikalischen Eigenschaften des Werkstoffs. Spannungen können auch durch eine Schwindungsbehinderung verursacht werden.

Die Maßnahmen zur Verminderung von Gußspannungen erstrecken sich nicht nur auf ein sachgemäßes und gieße-

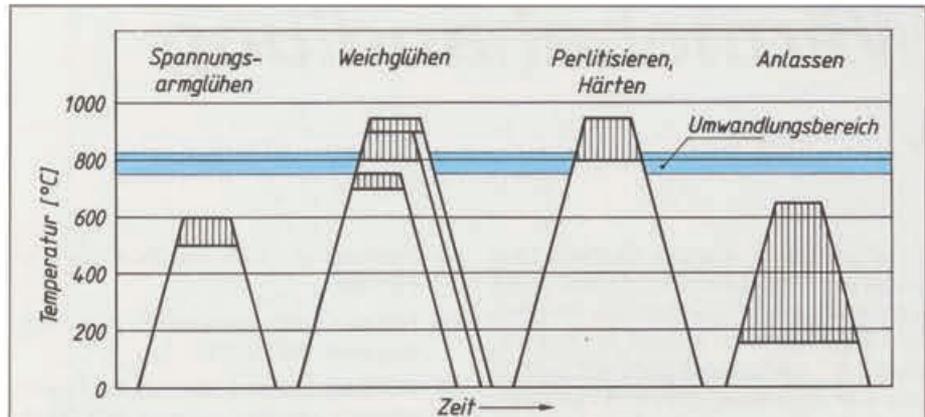


Bild 96: Schematische Darstellung der wichtigsten Wärmebehandlungsverfahren für Gußeisenwerkstoffe

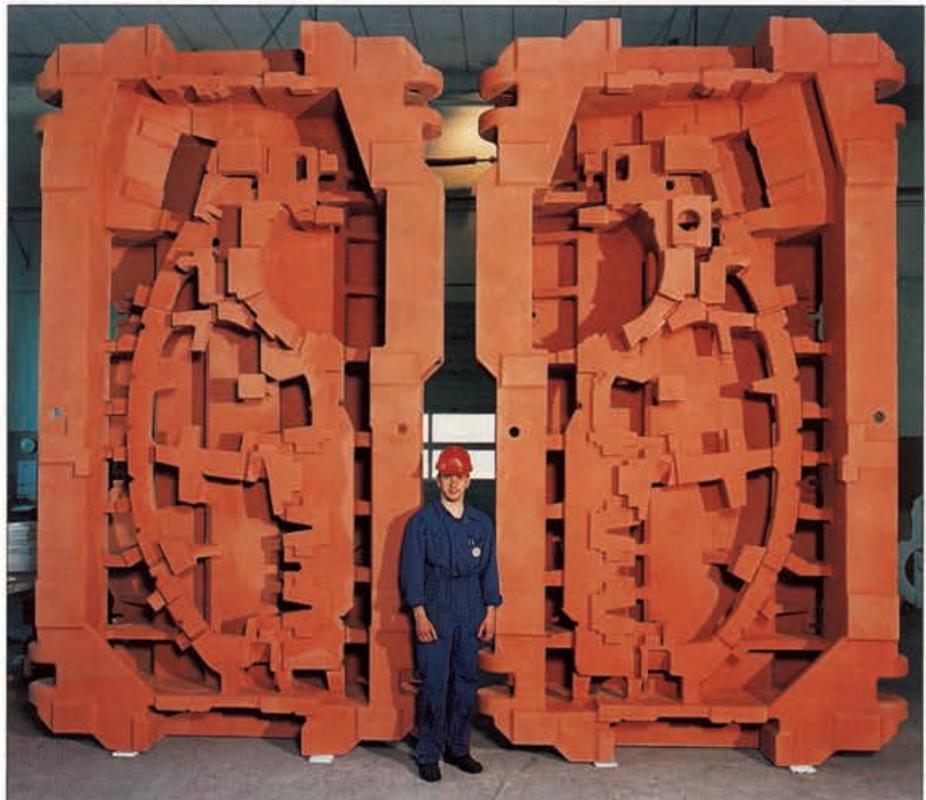


Bild 97: Spannungsarm gegläute Beschneidewerkzeuge für eine Pkw-Seitenwand; Werkstoff: GJL-250, Abmessungen: 4500 × 2500 mm, Stückgewicht: 18 t

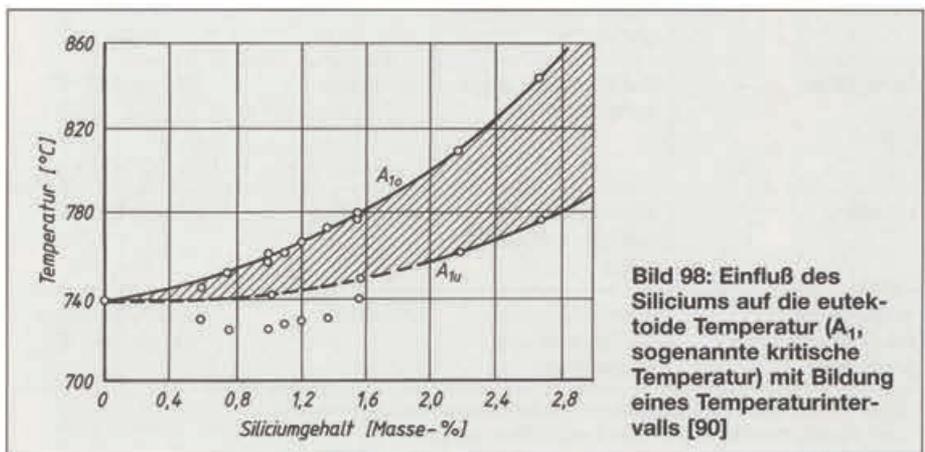


Bild 98: Einfluß des Siliciums auf die eutektoide Temperatur (A_1 , sogenannte kritische Temperatur) mit Bildung eines Temperaturintervalls [90]

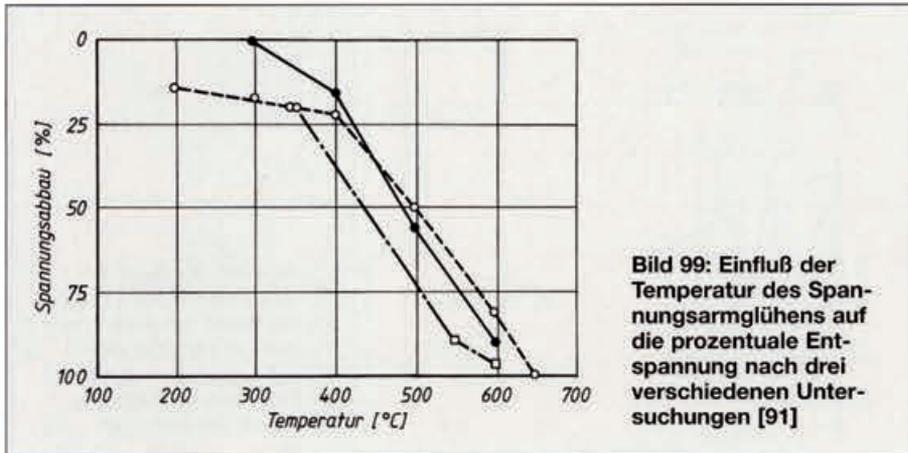


Bild 99: Einfluß der Temperatur des Spannungsarmglühens auf die prozentuale Entspannung nach drei verschiedenen Untersuchungen [91]

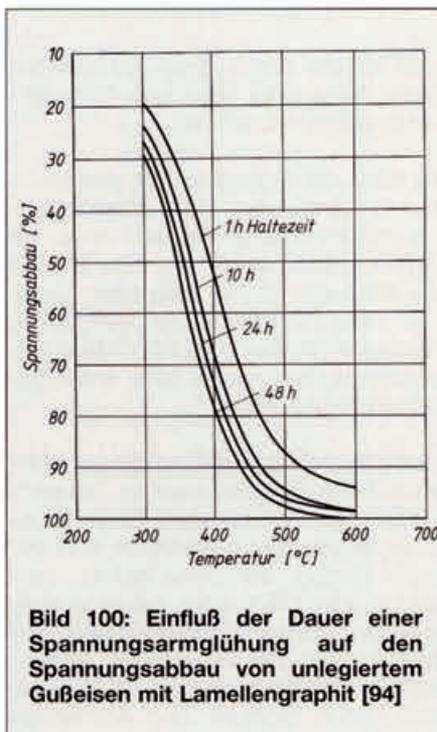


Bild 100: Einfluß der Dauer einer Spannungsarmglühung auf den Spannungsabbau von unlegiertem Gußeisen mit Lamellengraphit [94]



Bild 101: Scheibenbremse Ø 680 mm für Schienenfahrzeuge; der Bremsring aus GJL-250 ist spannungsarm gegläht, die Paßflächen zur Nabe sind auf >48 HRC flammgehärtet

rechtes Konstruieren und die Wahl des geeigneten Werkstoffs, sondern auch auf eine zweckentsprechende Beeinflussung der Abkühlgeschwindigkeit von unterschiedlichen Wanddicken durch gießereitechnische Maßnahmen, wie beispielsweise das Anlegen von Kühlkokillen.

Zum Verringern von Gußspannungen ist die Wärmebehandlung die sicherste Methode. Hierbei werden die Spannungen aufgrund der niedrigen Elastizitätsgrenze bei höherer Temperatur beseitigt. Die auftretenden plastischen Verformungen – Fließen oder Kriechen – bewirken ein fast vollständiges Entspannen der Gußstücke. Eine verbleibende Restspannung ist bei den für Gußeisen möglichen Glühtemperaturen nicht zu vermeiden, da bei den angewendeten Temperaturen die Elastizitätsgrenze nicht auf Null vermindert wird. Das Spannungsarmglühen erfolgt bei Temperaturen unterhalb der Austenitumwandlung (A_{c1}) mit anschließendem langsamen Abkühlen, wie schematisch in Bild 96 wiedergegeben ist. Mit steigender Haltezeit und Temperatur wird die Glühbehandlung wirkungsvoller. Die Temperatur darf jedoch nicht so hoch sein, daß eine Gefügeveränderung (Umwandlung von Perlit in Ferrit und Graphit) einsetzt, da damit eine Abnahme der Festigkeit verbunden ist.

Der Einfluß der Temperatur auf die prozentuale Entspannung ist in Bild 99 dargestellt. Danach beträgt der Spannungsabbau unter 400 °C nur 20 bis 30 %, bei höheren Temperaturen steigt er dagegen rasch an und erreicht etwa 75 % bei 500 °C.

Bei unlegiertem Gußeisen mit Lamellengraphit kann bei Temperaturen von mehr als 600 °C oder längeren Haltezeiten bei niedrigeren Temperaturen eine Gefügeveränderung auftreten,

wodurch Festigkeit und Härte vermindert und die Bearbeitbarkeit verbessert werden. Durch eine einfache Härteprüfung vor und nach der Wärmebehandlung läßt sich die möglicherweise eingetretene Gefügeveränderung leicht feststellen.

Bei unlegierten Gußeisensorten mit niedriger Festigkeit treten im allgemeinen nur geringe Spannungen auf, die Elastizitätsgrenze ist vergleichsweise niedrig. Hier beträgt die empfohlene Temperatur für das Spannungsarmglühen 500 bis 550 °C [92]. Bei hochfesten Sorten muß die Temperatur meist auf 570 bis 580 °C erhöht werden, um einen Spannungsabbau von mehr als 70 % zu erzielen.

Für niedriglegiertes Gußeisen wird ein höherer Temperaturbereich von 550 bis 600 °C vorgeschlagen [92], da Legierungselemente wie Chrom, Molybdän, Nickel und Vanadium dazu neigen, die Warmfestigkeit von Gußeisen zu erhöhen. Hinzu kommt, daß carbidstabilisierende Legierungselemente den Perlitfall fast ganz verhindern, der bei unlegiertem Gußeisen bei diesen Glühtemperaturen auftreten würde.

Gußstücke aus Werkstoffen mit einem Gefüge aus Martensit, Bainit oder Vergütungsgefüge können ohne eine auftretende Gefügeveränderung nicht wirklich spannungsarm gegläht werden, da die notwendigen Glühtemperaturen immer einen Anlaßeffekt ausüben würden [93].

Das Aufheizen auf Behandlungstemperatur sollte vor allem bei sperrigen Gußstücken und großen Wanddicken unterschieden langsam erfolgen, damit ein gleichmäßiges Erwärmen gewährleistet ist. Aufheizgeschwindigkeiten von 10 bis 25 K/h werden empfohlen; bei einfacher Geometrie und gleichmäßigen Wanddicken kann sie 30 bis 50 K/h betragen. Da der Spannungsabbau zum überwiegenden Teil bereits während der Aufheizperiode und der ersten Glühstunde erfolgt, ist es wirtschaftlicher, hohe Temperaturen und kurze Haltezeiten anzuwenden als niedrige Temperaturen und lange Haltezeiten. Bild 100 gibt einen Überblick über den Einfluß der Glühdauer auf den Spannungsabbau. Als Haltezeit wird eine Stunde zuzüglich einer Stunde je 25 mm Wanddicke empfohlen.

Um das erneute Auftreten von Spannungen zu vermeiden, müssen die Gußstücke nach dem Halten bei Glühtemperaturen zumindest im höheren

Temperaturbereich langsam abgekühlt werden, bis etwa 300 °C dürfen 40 K/h nicht überschritten werden. Es wird vorgeschlagen, die Abkühlgeschwindigkeit genauso einzustellen wie die Aufheizgeschwindigkeit. Für den größten Teil der Anwendungsfälle haben sich 25 bis 35 K/h bewährt.

Die vorgeschriebene Abkühlgeschwindigkeit muß mindestens bis zu einer Temperatur von 300 °C eingehalten werden, danach kann für geometrisch einfache Bauteile die weitere Abkühlung an ruhender Luft erfolgen. Komplizierte Teile und Gußstücke mit größeren Wanddickenunterschieden müssen unter Umständen bis 100 °C im Ofen abkühlen.

Weichglühen

Beim Weichglühen – auch Ferritglühen, Ferritisieren oder Graphitisieren genannt – wird das Gußstück auf solche Temperaturen erhitzt, daß während einer bestimmten Glühdauer der freie Zementit und/oder der Zementit im Perlit sich in die Gefügebestandteile Ferrit und Graphit auflösen, um einen möglichst weichen Gefügestand zu erhalten. Der Zweck einer solchen Behandlung ist das Verbessern der Bearbeitbarkeit. Ein weiterer Vorteil des Weichglühens ist, daß bei ausreichend langsamem Abkühlen (Ofenabkühlung) gleichzeitig die Eigenspannungen fast vollständig beseitigt werden.

Das Weichglühen kann in verschiedenen Temperaturbereichen erfolgen, Bild 96. Obwohl bei sehr langen Glühzeiten in unlegiertem Gußeisen schon ab 400 °C ein geringer Zerfall des Perlits eintritt, wächst die Geschwindigkeit des Perlitzerfalls erst ab 620 °C merklich an und erreicht ein Maximum kurz unterhalb der kritischen Temperatur, die für unlegiertes und niedriglegiertes Gußeisen zwischen 740 und 820 °C liegt, Bild 102.

Beim Ferritisieren diffundiert der im Zementit gebundene Kohlenstoff zum vorhandenen Graphit hin. Mit dem Ausscheiden des Kohlenstoffs als Graphit tritt aufgrund der damit verbundenen Volumenvergrößerung ein Wachsen des Werkstoffes ein, dessen Größe von der chemischen Zusammensetzung, der Glüh Temperatur und der Glühzeit abhängig ist.

Aus Bild 104 ist die Bedeutung der richtigen Temperaturwahl für ein wirt-

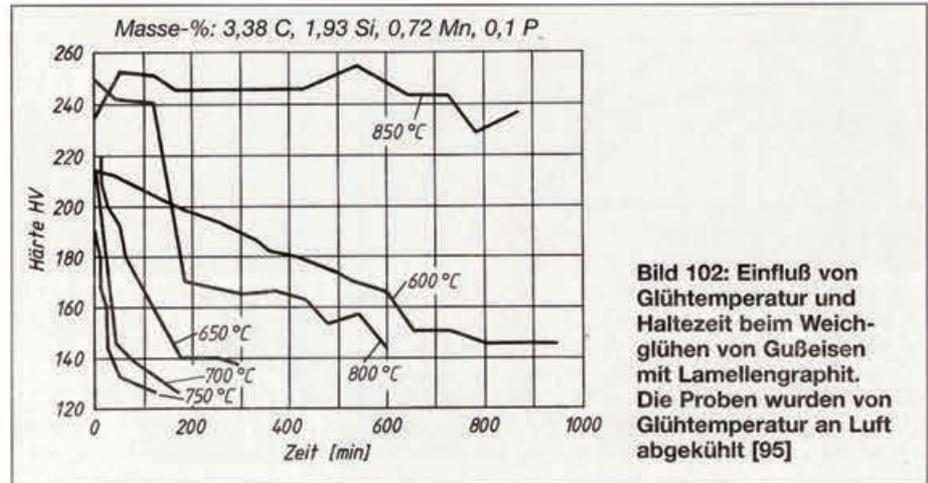


Bild 102: Einfluß von Glüh Temperatur und Haltezeit beim Weichglühen von Gußeisen mit Lamellengraphit. Die Proben wurden von Glüh Temperatur an Luft abgekühlt [95]

schaftliches Weichglühen zu erkennen, da das Ausmaß des Wachstums ein Maß für die Umwandlung des Zementits in Ferrit und Graphit ist. Die Umwandlungsgeschwindigkeit ist kurz unterhalb der kritischen Temperatur (A_{1u}) am größten, dagegen zeigt das „Null-Wachstum“ bei der oberen kritischen Temperatur (A_{1o}), daß selbst

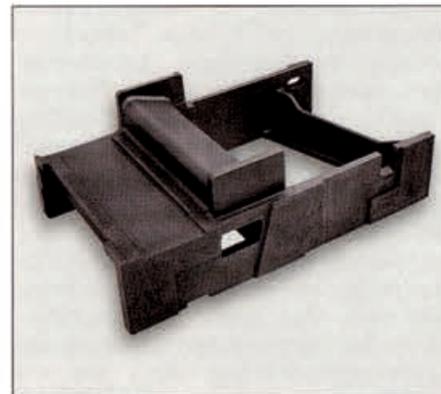


Bild 103: Seitenwand aus GJL-HB175 für eine Druckmaschine, Gewicht: 430 kg

nach einem 12stündigen Glühen bei dieser Temperatur noch kein Zementit zerfall stattgefunden hat.

Die Höhe des kritischen Temperaturbereichs hängt von der chemischen Zusammensetzung und dem Anteil an Legierungselementen ab. Der Einfluß des Siliciums ist hier besonders groß: 1 % Silicium erhöht die eutektoide Temperatur A_1 um etwa 25 °C (Bild 98), gleichzeitig fördert es sehr stark die Kohlenstoffdiffusion.

Beim Weichglühen diffundiert der Kohlenstoff aus dem zerfallenden Zementit zu den nächstgelegenen Graphitausscheidungen und kristallisiert dort an. Jeder Einfluß, der diese beiden Vorgänge erleichtert oder beschleunigt, begünstigt daher das Ferritisieren, und jeder Einfluß, der sie hemmt, begünstigt die Perlitbildung. Das Ferritisieren wird durch Silicium und Aluminium beschleunigt, durch Chrom, Mangan, Vanadium, Molybdän und Schwefel verzögert oder gar verhindert.

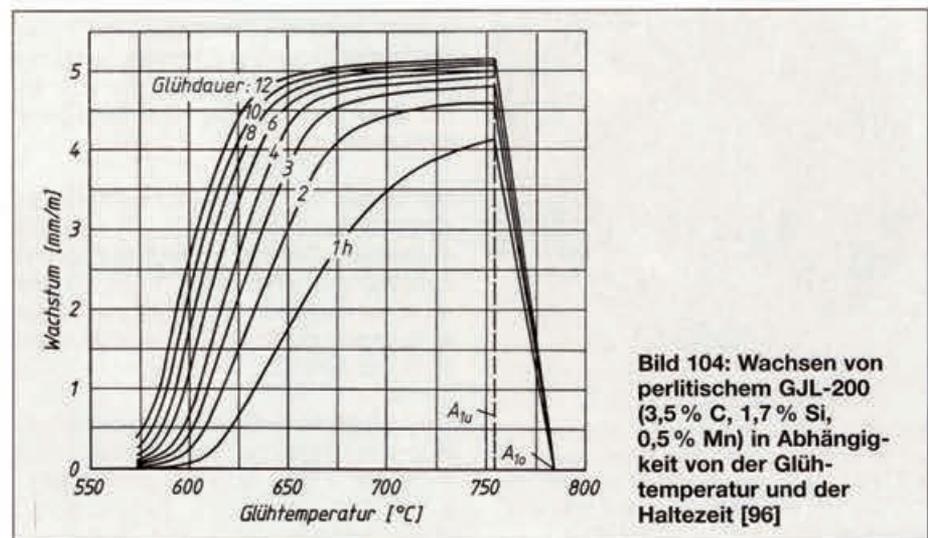


Bild 104: Wachsen von perlitischem GJL-200 (3,5 % C, 1,7 % Si, 0,5 % Mn) in Abhängigkeit von der Glüh Temperatur und der Haltezeit [96]

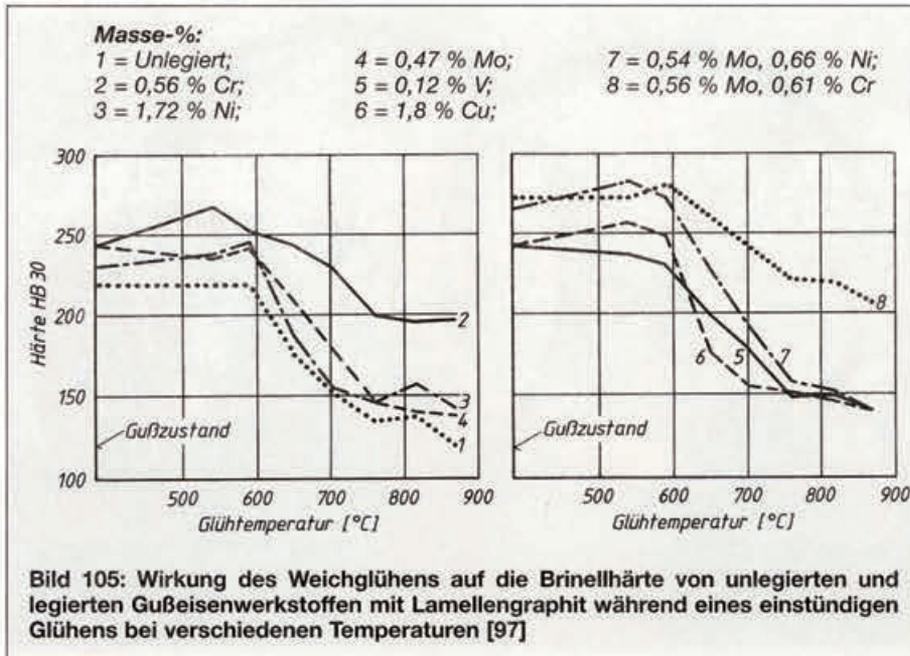


Bild 105 zeigt die Härteänderungen von Gußeisen gleicher chemischer Ausgangszusammensetzung unter dem Einfluß verschiedener Legierungselemente bei unterschiedlichen Glühtemperaturen. Chrom hat danach den größten Einfluß auf die Gefügestabilität, während Nickel fast ohne Einfluß ist.

Bei der Umwandlung eines perlitischen Gefüges in ein ferritisches muß bei Gußeisen mit Lamellengraphit mit einem Abfall der Zugfestigkeit von 10 bis 30 % gerechnet werden [97]. Die größte Abnahme tritt bei unlegierten Sorten auf, während Legierungselemente, besonders Molybdän, den Festigkeitsabfall stark verzögern. Die erzielte Endhärte nach einem Weichglühen ist also in keinem Fall ein Kennzeichen für die Zugfestigkeit. Abhängig vom Gehalt an carbidstabilisierenden

Elementen verringert sich die Brinellhärte um 30 bis 150 Einheiten [99].

Abhängig vom Ausgangsgefüge beziehungsweise der chemischen Zusammensetzung kann das Weichglühen in drei Temperaturbereichen durchgeführt werden:

Weichglühen bei niedriger Temperatur (unterhalb A_{c1})

Unlegierte Gußeisenwerkstoffe brauchen zum teilweisen oder vollständigen Umwandeln des im Perlit vorhandenen Zementits in Ferrit und Graphit meist nicht oberhalb der A_{c1} -Temperatur gegläht zu werden. Höhere Glühtemperaturen können sogar schädlich sein, da der Kohlenstoff dann beginnt, sich im Austenit zu lösen, der sich bei entsprechend schneller Abkühlung in Perlit (und damit zum Teil in Zementit)

umwandeln würde. Dies ist der Grund für das gleichbleibende Niveau der 850-°C-Kurve in Bild 102. In den meisten Fällen ist eine Glüh-temperatur von 700 bis 760 °C ausreichend, um ein rein ferritisches Gefüge und damit beste Bearbeitbarkeit zu erreichen. Die Haltezeit beträgt eine Stunde je 25 mm Wanddicke, bei Temperaturen nahe A_{c1} kann sie auf 45 Minuten je 25 mm Wanddicke verringert werden [98].

Es ist zu beachten, daß mit dieser Wärmebehandlung unterhalb der kritischen Temperatur A_{c1} weder freier Zementit noch andere Carbide aufgelöst werden können, da sie bei diesen Temperaturen noch beständig sind.

Weichglühen bei mittlerer Temperatur (geringfügig oberhalb A_{c1})

Das Glühen im Temperaturbereich von 790 bis 900 °C wird in der Regel dann angewandt, wenn die niedrigeren Temperaturen nicht mehr ausreichen, da entweder die Siliciumgehalte zu gering sind oder der Anteil an carbidstabilisierenden Elementen zu hoch ist. Die meisten Gußeisensorten können bei diesen mittleren Temperaturen gegläht werden. Die Haltezeit beträgt eine Stunde je 25 mm Wanddicke.

Beim Abkühlen ist auf eine geringe Abkühlgeschwindigkeit (10 bis 20 K/h) während des Durchganges durch den kritischen Temperaturbereich zwischen 800 bis 680 °C besonders zu achten, da sich sonst Perlit bilden kann. Anschließend kann bis 300 °C mit 40 bis 60 K/h im Ofen abgekühlt werden.

Weichglühen bei hoher Temperatur (wesentlich über A_{c1})

Enthält das Gefüge eines weichzu-glühenden Gußeisens freien Zementit oder andere Carbide, muß eine Min-



Bild 106: Gerätewagen aus GJL-250 für eine Druckzylinder-Graviermaschine, Gewicht: 229 kg

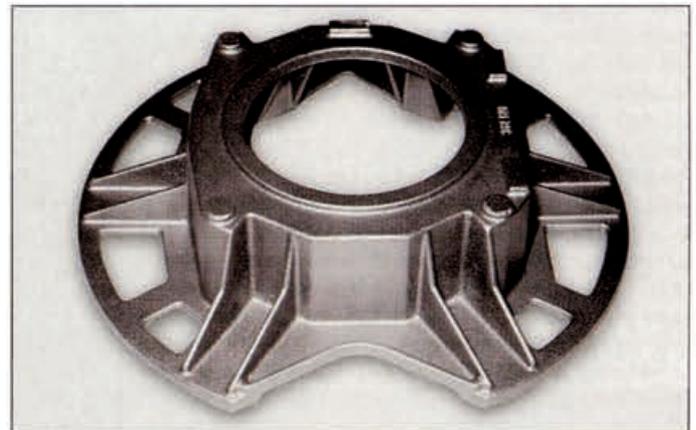


Bild 107: Objektivträger (ferritisch gegläht) für eine Luftbild-Meßkamera; Werkstoff: GJL-100, 320 mm Ø, Gewicht: 7,5 kg

destemperatur von 855 °C eingehalten werden. Um die Haltezeit zu verkürzen, glüht man meist bei Temperaturen zwischen 900 und 955 °C bei einer Haltezeit von einer bis drei Stunden und zusätzlich einer Stunde je 25 mm Wanddicke. Beträgt der Phosphorgehalt mehr als 0,3 %, so darf eine Glühtemperatur von 955 °C auf keinen Fall überschritten werden, um das Aufschmelzen des ternären Phosphideutektikums zu verhindern.

Die Abkühlgeschwindigkeit hängt von den späteren Einsatzbedingungen des Gußstücks ab. Sollen nur die harten Stellen im Gefüge (Zementit, Carbide) unter Beibehaltung von Zugfestigkeit und Härte entfernt werden, so muß von der Glühtemperatur bis auf etwa 550 °C an bewegter Luft abgekühlt werden, um die Bildung von Perlit zu gewährleisten. Um die hierbei eventuell entstehenden inneren Spannungen zu verringern, soll das weitere Abkühlen im Ofen erfolgen. Für ein ferritisches Gefüge muß der Temperaturbereich von 800 bis 680 °C langsam (10 bis 20 K/h) durchlaufen werden. Bis 300 °C kann dann normal im Ofen mit 40 bis 50 K/h abgekühlt werden.

Perlitglühen

Ziel des Perlitglühens (Normalisieren oder Perlitisieren) ist ein voll- oder teileritisch Gefüge, um die Festigkeit zu erhöhen oder die Eigenschaften in unterschiedlichen Wanddickenbereichen zu vergleichmäßigen. Es ist gleichgültig, welches Ausgangsgefüge vorliegt, ob ferritisch oder perlitisch mit eingelagerten Carbiden. Höhere Ferritgehalte verlangen eine längere Haltezeit im Austenitbereich oder eine zweifache Wärmebehandlung, um ausreichend Kohlenstoff zu lösen.

Das Perlitglühen ist ein Austenitisierungsglühen, wie schon unter „Weichglühen bei hoher Temperatur“ beschrieben. Anschließend wird so schnell abgekühlt, daß eine Ferritbildung vermieden wird, aber kein Härtinggefüge entstehen kann. Der Temperaturverlauf ist schematisch in *Bild 110* dargestellt. Die Austenitisierungstemperatur sollte nur so hoch wie nötig sein, weil bei längerer Haltezeit oberhalb 900 bis 920 °C der Austenit und der daraus entstehende Perlit mit negativen Auswirkungen auf die Festigkeitseigenschaften vergrößert wird.

Die Abkühlgeschwindigkeit nach dem Austenitisieren wird von der aufge-



Bild 108: Teilweise spannungsarm geprüfte Riemen- und Schwungscheiben in vielfältigen Konstruktionen aus GJL-200 oder -250

nommenen Wärmemenge bestimmt: Schwere, dickwandigere Gußstücke müssen meist an bewegter Luft abgekühlt werden, bei dünnwandigen Gußstücken reicht in der Regel ruhende Luft. Zur Verringerung der bei der schnellen Abkühlung eingebrachten Spannungen genügt es, die schnelle Abkühlung nur bis rd. 550 °C durchzuführen, evtl. einige Zeit bei dieser Tem-

peratur zu halten und eine Ofenabkühlung folgen zu lassen. Da das exakte Abfangen bei diesen Temperaturen in der Praxis selten durchzuführen ist, wird meist auf unter 400 °C abgekühlt und ein Spannungsarmglühen abgeschlossen.

Härten und Vergüten

Die mechanischen Eigenschaften und der Verschleißwiderstand von Gußeisenwerkstoffen können durch Härten und Vergüten maßgeblich verbessert werden. Bei Gußeisen mit Lamellengraphit kommt in der Regel jedoch nur das partielle Randschichthärtens zur Anwendung, zum Beispiel für die Laufbahnen von Werkzeugmaschinen oder Nockenwellen; dies wird nachfolgend beschrieben.



Bild 109: Zwecks besserer Bearbeitbarkeit ferritisch geprüfte Flügelräder aus GJL-150 für Pkw-Wasserpumpen

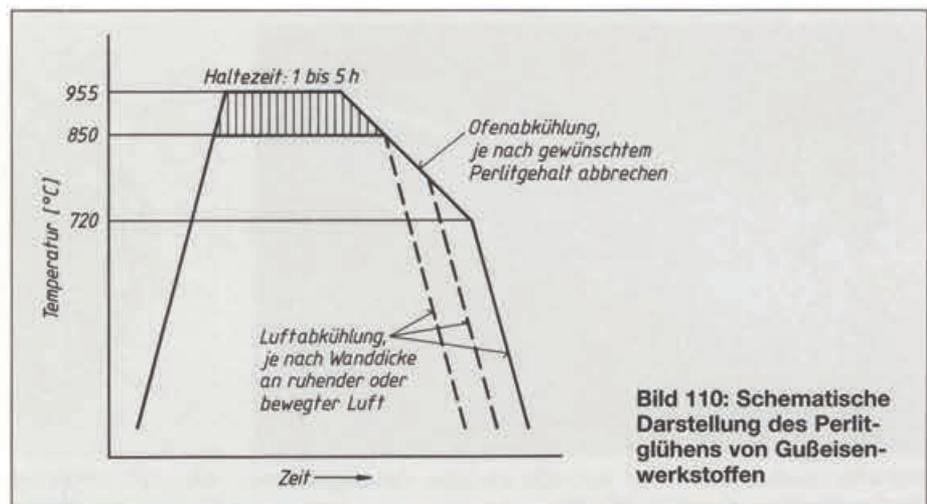


Bild 110: Schematische Darstellung des Perlitglühens von Gußeisenwerkstoffen

Randschichthärten

Durch Randschichthärten wird der Widerstand von Gußwerkstücken gegen Verschleiß und/oder örtliche Pressung entscheidend verbessert. Dabei werden meist gleichzeitig Druckeigenstressungen in die Randzone eingebracht, wodurch die Dauerfestigkeit günstig beeinflusst wird. Bild 111 gibt eine Übersicht der bei Gußeisen mit Lamellengraphit angewendeten Verfahren. Danach wird unterschieden zwischen thermophysikalischen Verfahren, die auf einem martensitischen oder ledeburitischen Umwandeln der Randschicht beruhen, und thermochemischen Verfahren, bei denen chemische Veränderungen der Randschicht erfolgen.

Die thermophysikalische Härtebarkeit von Gußeisen mit Lamellengraphit basiert auf den unterschiedlichen Erscheinungs- beziehungsweise Bindungsformen des Kohlenstoffs im Gefüge. Beim martensitischen Härten ist es die unterschiedliche, temperaturabhängige Löslichkeit des Kohlenstoffs im Eisen im festen Zustand, für das ledeburitische Härten ist von Bedeutung, daß der Kohlenstoff elementar als Graphit oder chemisch gebunden als Eisencarbid (Fe_3C) vorliegen kann.

Martensitisches Härten

Beim martensitischen Härten wird die zu härtende Gußstückpartie örtlich in den Austenitbereich zwischen 850 und 950 °C erhitzt, wobei das Aufheizen entsprechend Bild 111 nach verschiedenen Verfahren erfolgen kann. Mit Emulsion, Öl oder Wasser wird anschließend abgeschreckt. Beim Laserhärten wird kein Abschreckmittel benötigt: Der hohe Temperaturgradient bewirkt eine so rasche Wärmeableitung, daß die Umwandlung in Martensit durch „Selbstabschrecken“ erfolgt [100].

Um eine gute Randschichthärtung auf etwa 55 bis 60 HRC zu erzielen, ist es nötig, daß die zu härtenden Werkstückbereiche vor dem Abschrecken möglichst schnell über den kritischen Temperaturbereich (A_{c1}) hinaus erhitzt werden. Silicium verzögert diesen Vor-

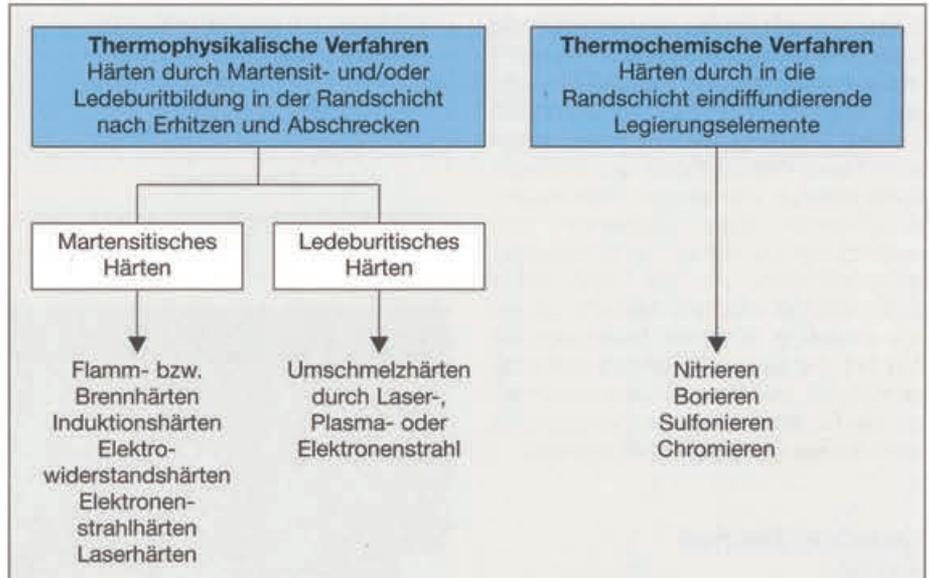


Bild 111: Verfahren zum Randschichthärten von Werkstücken aus Gußeisen mit Lamellengraphit

gang, da es mit zunehmenden Gehalten die Wärmeleitfähigkeit verringert. Allgemein gilt, daß die Ausgangshärte ein Anhaltswert für die Härtebarkeit von Gußeisen mit Lamellengraphit ist. Sorten mit höherer Härte – weniger freier Ferrit, mehr und feinerer Perlit, feinere Graphitbildung – sprechen besser auf das Randschichthärten an als Sor-

ten mit niedrigerer Ausgangshärte. Bei ferritischem und ferritisch-perlitischem Grundgefüge wird daher zweckmäßigerweise eine mehrstufige Behandlung angewendet. Hierbei wird die Randschicht mehrmals auf etwa 800 °C erhitzt und zur Perlitbildung jeweils auf etwa 600 °C abgekühlt. Für das endgültige Härten wird auf 840 bis

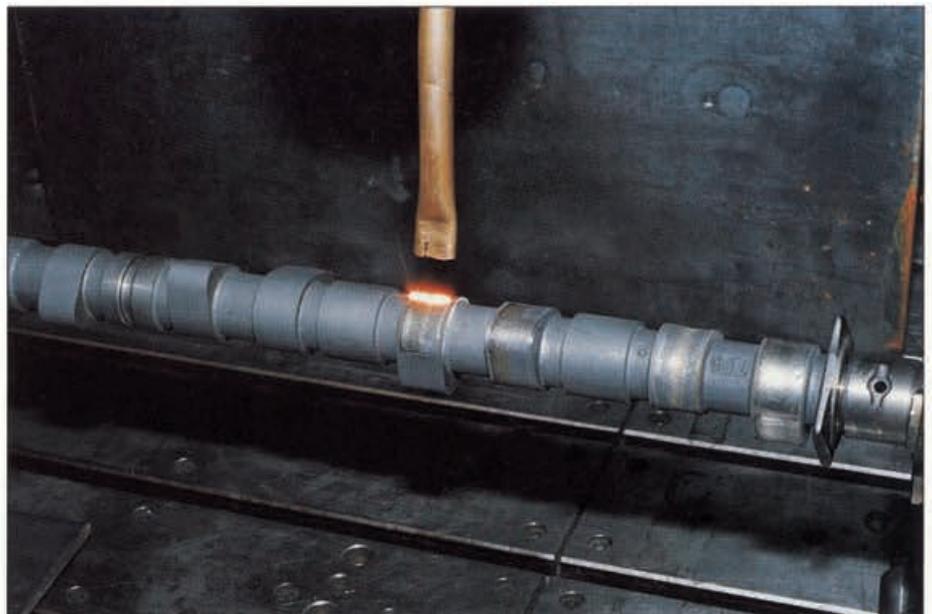


Bild 112: Härten (Umschmelzhärten) der Nocken einer Nockenwelle aus GJL-300 mit dem Laserstrahl; der Brennfleck ist hier zu einer Linie geformt, deren Länge auf die Nockenbreite abgestimmt ist

900 °C erhitzt und dann abgeschreckt. Mit einem kurzzeitigen Anlassen auf 200 °C können eingebrachte Härte­spannungen ohne nennenswerten Ver­lust an Härte abgebaut werden.

Die Einhärtetiefe beim Randschicht­härten ist abhängig von der Leistungs­dichte der Energiequelle, *Tabelle 25*. Je größer sie ist, desto schneller ist die Austenitisierungstemperatur erreicht und entsprechend kurz ist die Einwirk­zeit, wie in *Bild 113* schematisch gezeigt. Die längeren Erhitzungszeiten beim Flammhärten führen zu größeren Einhärtetiefen von einigen Millimetern im Vergleich zum Induktions- und Laserhärten, bei denen die Erhitzungs­zeiten nur kurz und die Einhärtetiefe entsprechend klein ist. Gerade wegen der erheblich kürzeren Erhitzungszeit und der genaueren Temperaturführung kann beim Induktions- und Laserhärten die Randschicht­härte genauer und reproduzierbarer eingestellt werden.

Ledeburitisches Härten

Das ledeburitische Härten ist ein Umschmelzhärten, bei dem mit Hilfe eines leistungsstarken Lichtbogens (WIG-Verfahren), Plasma-, Elektronen- oder Laserstrahls [102 bis 104] die Gußstück­randschicht örtlich angeschmolzen wird. Der als Graphit vorliegende Kohlenstoff wird dabei sehr schnell von der Schmelze gelöst. Nach einer extrem kurzen Erhitzungszeit kühlt die aufgeschmolzene Randschicht infolge der großen Abschreckwirkung der an sie angrenzenden, nicht erwärmten Gußstückpartien so rasch ab („Selbstabschrecken“), daß sie ledeburitisch erstarrt. Diese Schicht ist sehr feinkörnig (*Bild 114*), sie hat für zahlreiche Anwendungen eine bessere Verschleißbeständigkeit als martensitisch gehärtete Oberflächen.

Das Prinzip des ledeburitischen Här­ tens besteht in einer Neukristallisation

Tabelle 25: Leistungsdichte verschiedener Energiequellen für das Randschicht­härten

Energiequelle	Leistungsdichte [kW/mm ²]
Laserstrahl	bis 100
Induktion	~ 0,15
Plasmastrahl	~ 0,10
Brennerflamme	~ 0,01

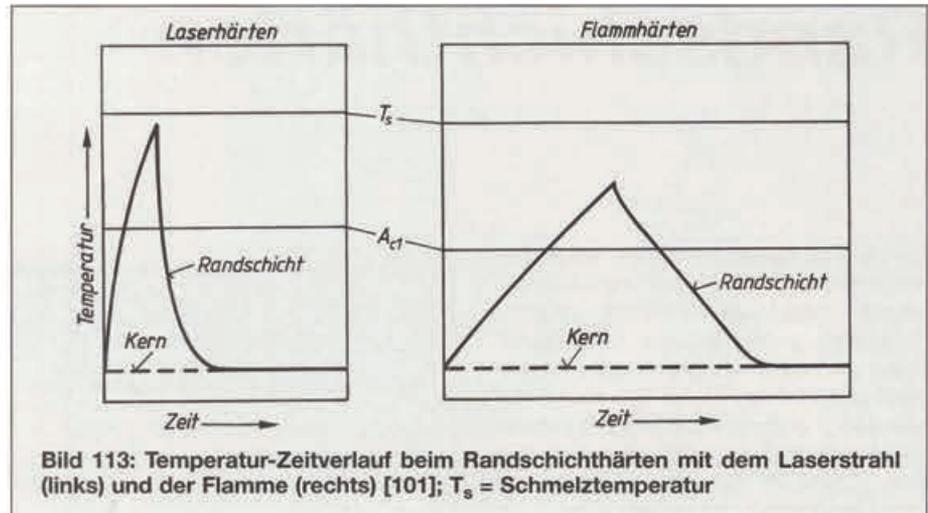


Bild 113: Temperatur-Zeitverlauf beim Randschicht­härten mit dem Laserstrahl (links) und der Flamme (rechts) [101]; T_s = Schmelztemperatur

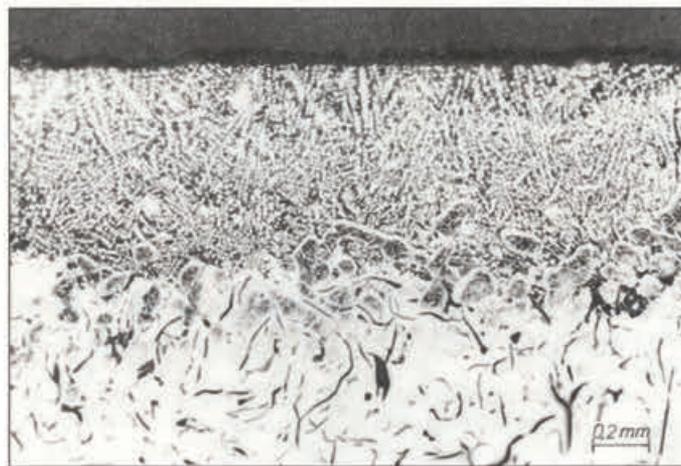


Bild 114: Struktur der mit dem Laser umgeschmolzenen Ledeburitzone auf Gußeisen mit Lamellengraphit (oben), unten = Ausgangsgefüge [104]; $V = 50 : 1$, Wiedergabe 0,7fach

der Randschicht, die in kürzester Zeit bis in eine Tiefe von ein bis zwei Millimetern aufgeschmolzen war. Mit dem Abschalten beziehungsweise Weiterbewegen der Energiequelle setzt eine sehr schnelle Abkühlung ein. Auf diese Weise entsteht eine deutlich abge-

grenzte Randzone (*Bild 114*), die unabhängig von den ursprünglichen Erstarrungsbedingungen bei der Herstellung des Gußstücks erstarrt ist. Der Härteverlauf (*Bild 119*) zeigt eine an die Ledeburitschicht angrenzende, martensitische Wärmeinflußzone.



Bild 115: Laufbuchse aus GJL-250 für einen Großdieselmotor, bahnweise lasergehärtet

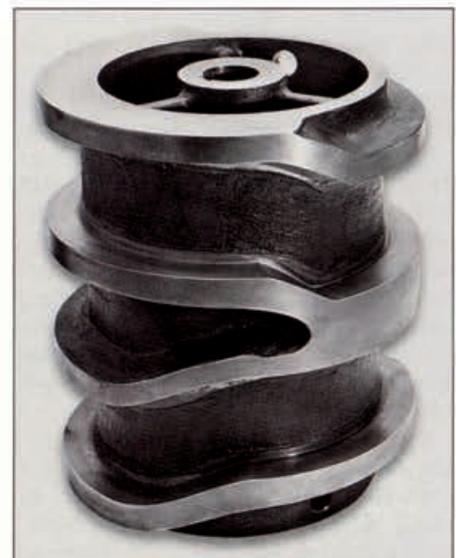


Bild 116: Nitrierte Steuertrommel aus GJL-350, Abmessungen: $\text{Ø } 320 \times 340$ mm, Gewicht: 61 kg

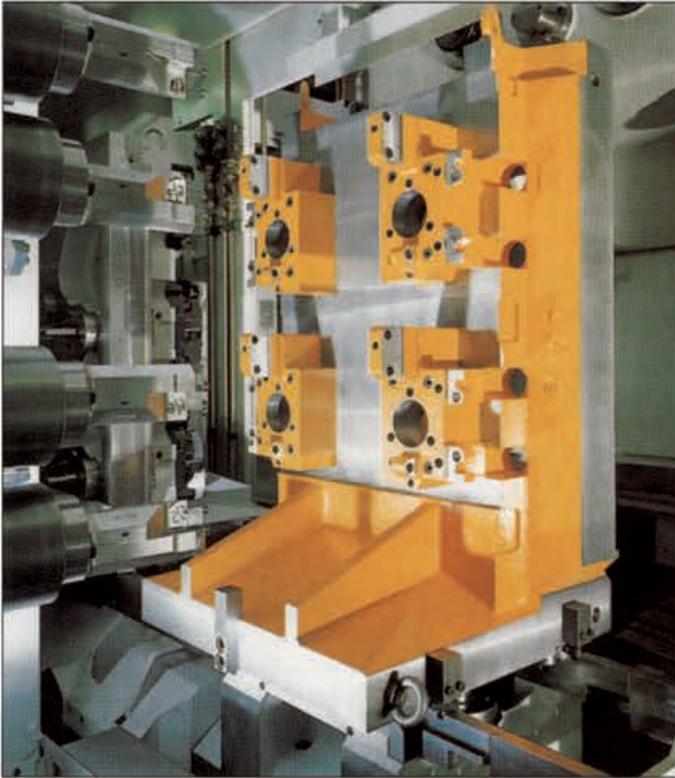


Bild 117: Spannvorrichtung zur Aufnahme von vier Werkstücken zum Bearbeiten, Werkstückaufnahmen gehärtet; Werkstoff: GJL-250, Abmessungen: 1000 × 800 × 1000 mm, Gewicht: 620 kg

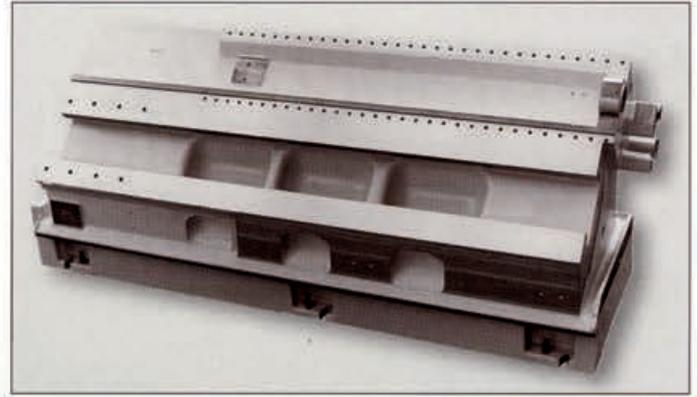


Bild 118: Werkzeugmaschinenbett aus GJL-300 mit induktiv gehärteten und geschliffenen Führungsbahnen, Abmessungen: 2410 × 840 × 980 mm, Gewicht: 2450 kg; unten: gleichmäßige Einhärtetiefe von etwa 3 mm, 54 ± 3 HRC

Thermochemische Verfahren

Die thermochemischen Härteverfahren beruhen darauf, daß härtesteigernde Elemente bei erhöhten Temperaturen in die Randschicht eines Werkstücks eindiffundieren. Sie bilden harte, verschleißbeständige Verbindungen mit dem Grundwerkstoff Eisen und/oder mit den Begleit- und Legierungselementen. – Ein Einsatzhärten ist bei Gußeisen mit Lamellengraphit unsinnig, denn hier ist der vorhandene Kohlenstoffgehalt schon wesentlich größer als für das Härten notwendig ist.

Am häufigsten wird das Nitrieren angewendet; Verfahrensarten sind u.a. das Salzbad- und Tenifernitrieren, das Ionitrieren sowie das Gas- und Pulvernitrieren [105, 106]. Beim Nitrieren diffundiert Stickstoff aus stickstoffabgebenden Mitteln bei Temperaturen um 500 bis 580 °C in das Werkstück ein. Diese relativ niedrigen Temperaturen verhindern weitgehend Gefügeänderungen des Werkstoffs und beeinflussen damit die Eigenschaften im Kernbereich kaum. Daher treten maßliche Änderungen praktisch nicht auf, so daß fertig bearbeitete Teile nitriert werden können; auf eine nachträgliche Bearbeitung kann meist verzichtet werden.

Im Zeitraum von einigen Stunden bildet der eindiffundierende elementare Stickstoff eine äußere Verbindungsschicht sowie eine Diffusionszone. Die Verbindungsschicht ist aufgrund ihrer hohen Härte von über 800 HV sehr verschleißbeständig. *Bild 120* zeigt als Beispiel den Härteverlauf beim Ionitrieren verschiedener Gußeisenwerkstoffe.

Zu beachten ist, daß die Einhärtetiefen beim Nitrieren, verglichen mit denjenigen, die mit thermophysikalischen Härteverfahren erreichbar sind, recht gering sind: Die Verbindungsschicht überschreitet selten 0,05 mm, die Diffusionszone kaum 0,8 mm.

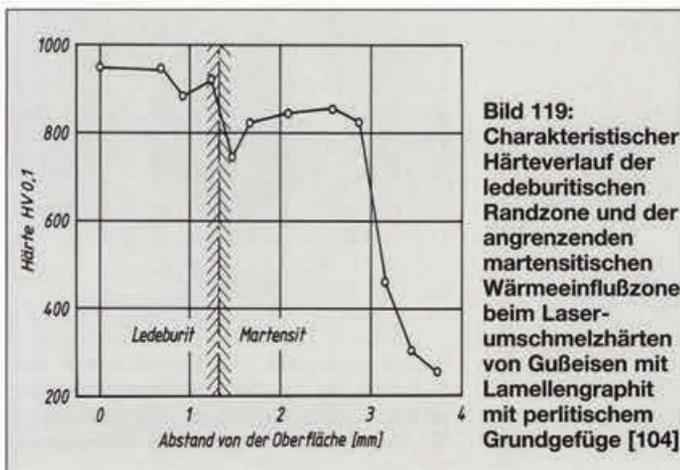


Bild 119: Charakteristischer Härteverlauf der ledeburitischen Randzone und der angrenzenden martensitischen Wärmeinflußzone beim Laserumschmelzhärten von Gußeisen mit Lamellengraphit mit perlitischem Grundgefüge [104]

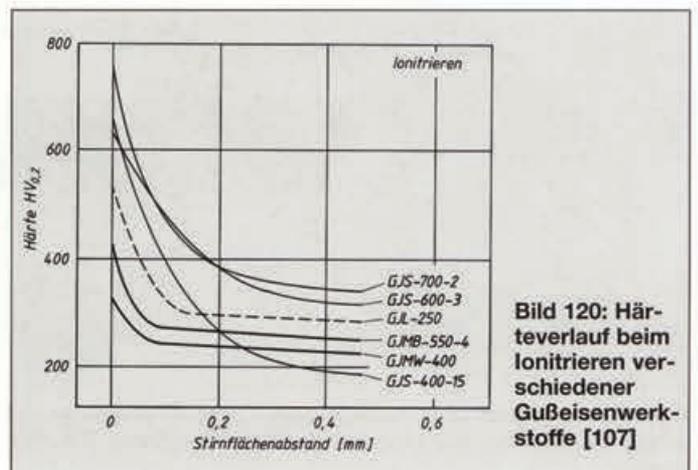
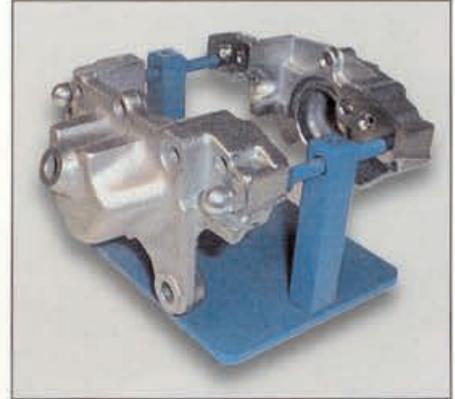


Bild 120: Härteverlauf beim Ionitrieren verschiedener Gußeisenwerkstoffe [107]

Kraftfahrzeuge



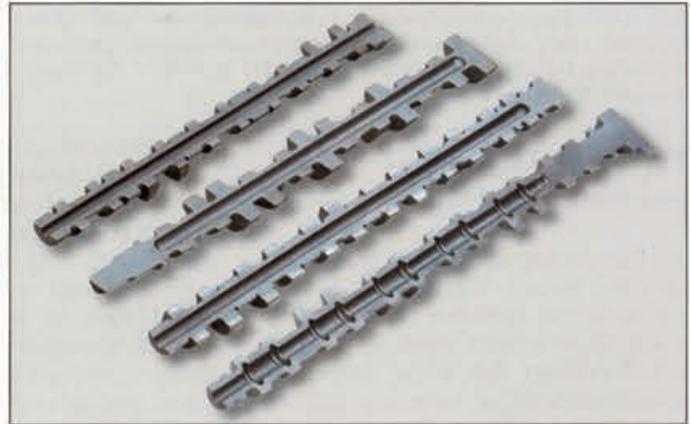
Sekundärschwungrad, Druck- und Anpreßplatte aus GJL-250 und -300 für eine Kfz.-Kupplung, Stückgewicht: bis 2,9 kg



Zweiteiliges Gehäuse aus GJL-250 für eine Scheibenbremse, Stückgewicht: bis 1,4 kg



Mit sehr unterschiedlichen Formen werden Ventilstößel aus GJL (Schalenhartguß) für Kfz.-Motoren gegossen.



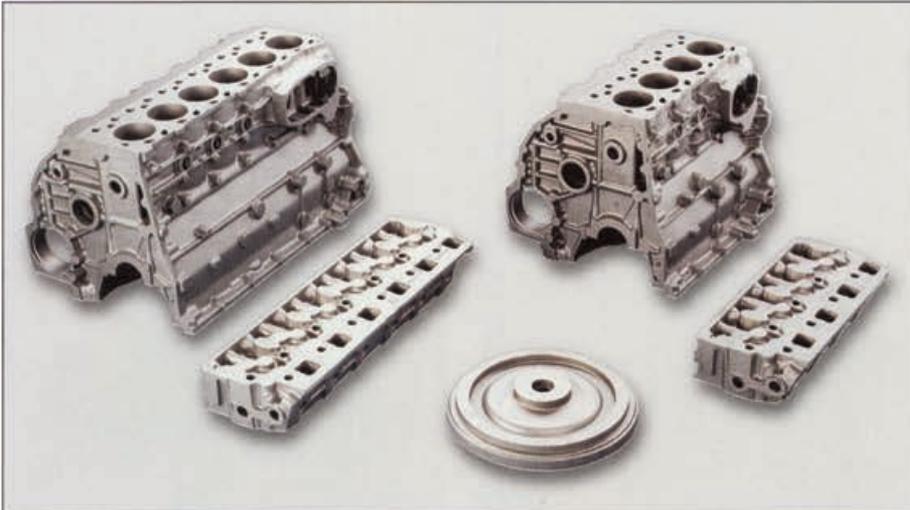
Verschiedene Ausführungen von aus GJL-250 (Schalenhartguß) hohlgegossenen Nockenwellen für Pkw-Motoren, geschnitten



Mit GJL – unlegiert und niedriglegiert – können problemlos und kostengünstig die unterschiedlichsten Kanalformen von innenbelüfteten Kfz.-Bremsscheiben realisiert werden.



Fertigbearbeitete Getriebetrommel aus GJL-250 für ein Automatikgetriebe der oberen Leistungsklasse; Abmessungen: $\text{Ø} 144,3 \text{ mm} \times 74 \text{ mm}$, min. Wanddicke: 2,0 mm



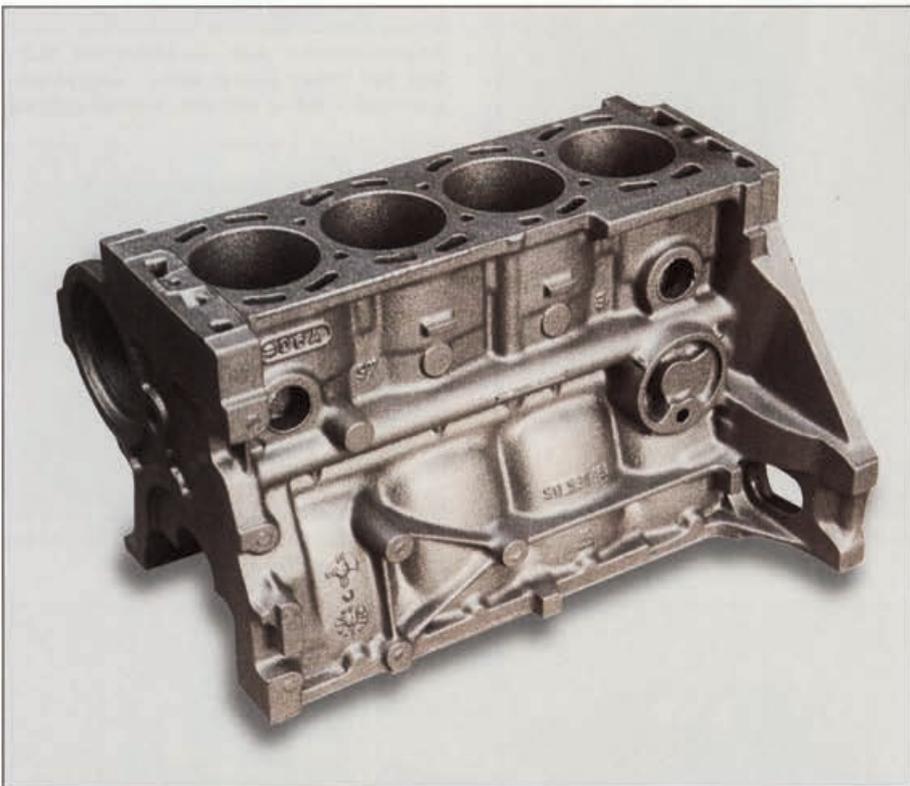
Zylinderkurbelgehäuse (217 oder 154 kg), zugehörige Zylinderköpfe (77 oder 53 kg) und Schwungscheibe (27 kg) aus GJL-250 und -300 für Lkw-Dieselmotoren



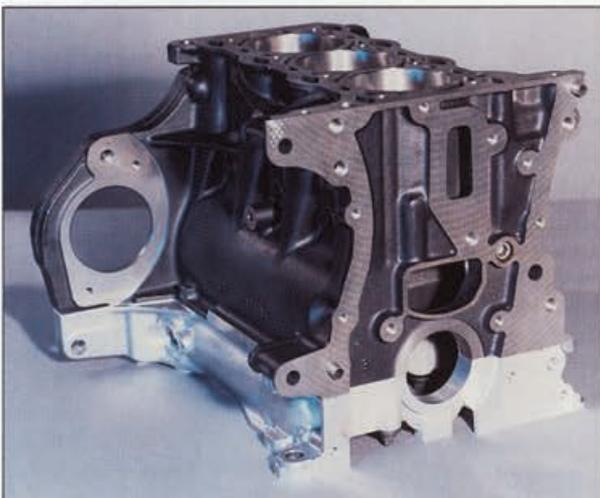
Die verschiedenen Gußeisenwerkstoffe sind ideal geeignet zum Herstellen von Kfz.-Abgaskrümmern.



Querschnitt eines Dieselmotor-Zylinderkopfes aus GJL-300; die die Gas-, Wasser- und Ölkanäle trennenden Wände haben eine Dicke von nur wenigen Millimetern.



Kfz.-Steuergehäuse aus GJL-200, Gewicht: 12,3 kg



▲ Leichtbau-Zylinderkurbelgehäuse aus GJL-250

◀ Zylinderkurbelgehäuse aus GJL-250 mit Bodenplatte für einen 3-Zyl.-Pkw-Motor



Belüftete Bremsscheibe aus hochgekohtem GJL-150 (CuCr-legiert) für einen Leicht-Lkw

Motorenbau



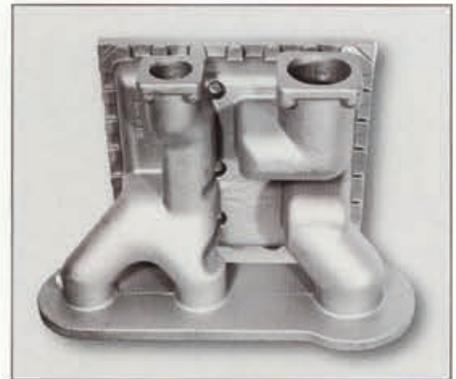
Zylinderlaufbuchsen aus niedriglegiertem GJL für Großmotoren mit Bohrungen von 320 bis 640 mm

► Teilgeschnittener Zylinderkopf aus GJL-300 (Mo-legiert) für einen Dieselmotor, Gewicht: 39 kg

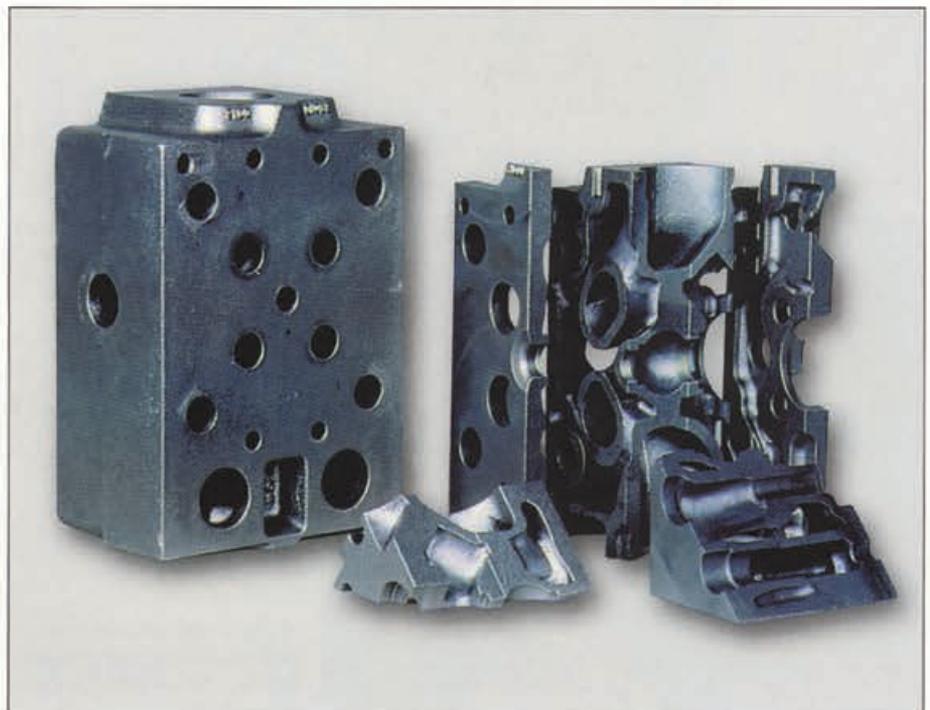
▼ Zylinderdeckel aus niedriglegiertem GJL für einen Großdieselmotor beim Vermessen

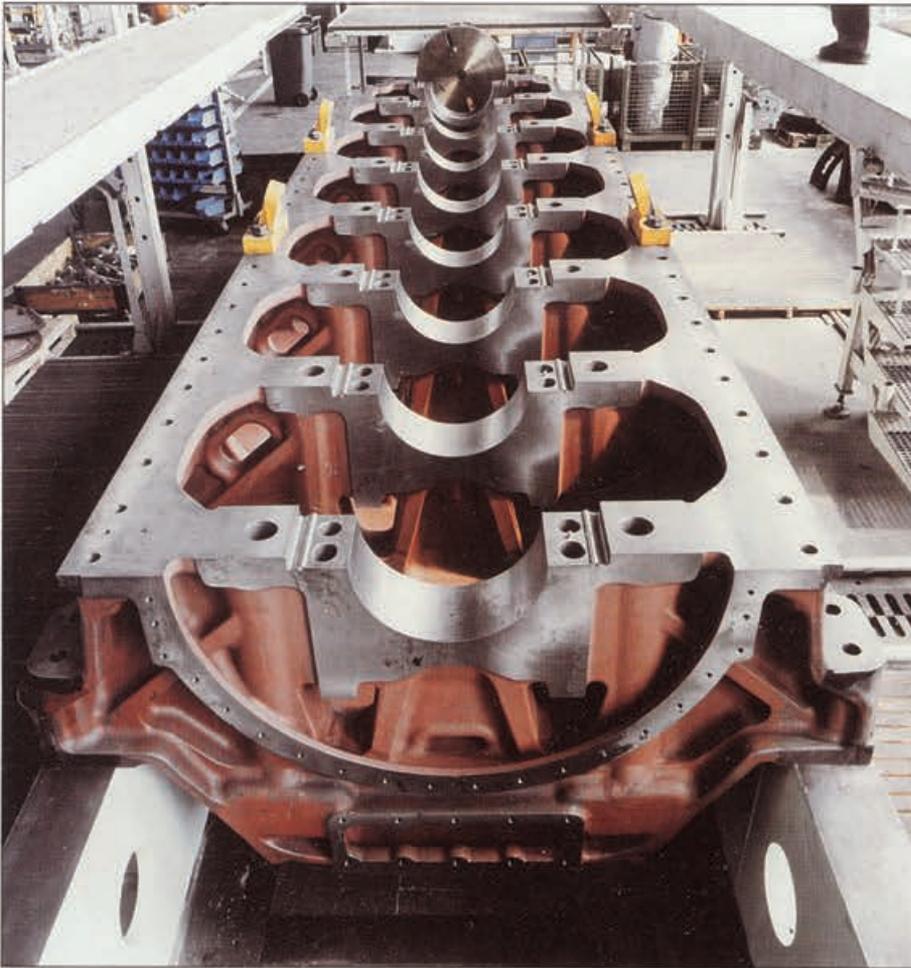


Zylindermantel aus Cu-legiertem GJL-300 für einen Dieselmotor; Abmessungen: 600 × 500 × 400 mm, Gewicht: 92 kg

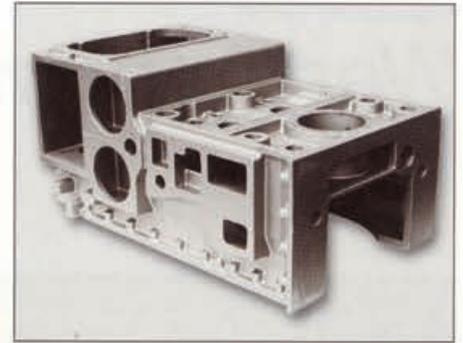


Verschlußdeckel aus GJL-250 für einen Dieselmotor, Gewicht: 78 kg





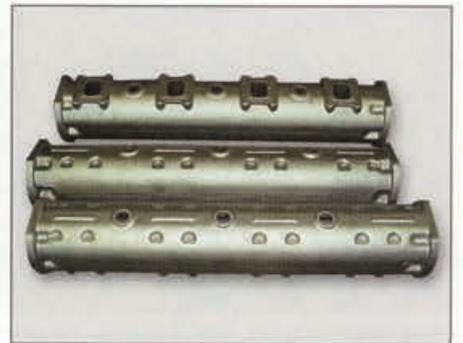
Grundplatte aus niedriglegiertem GJL-350 für einen Großdieselmotor, Gewicht: 9,4 t



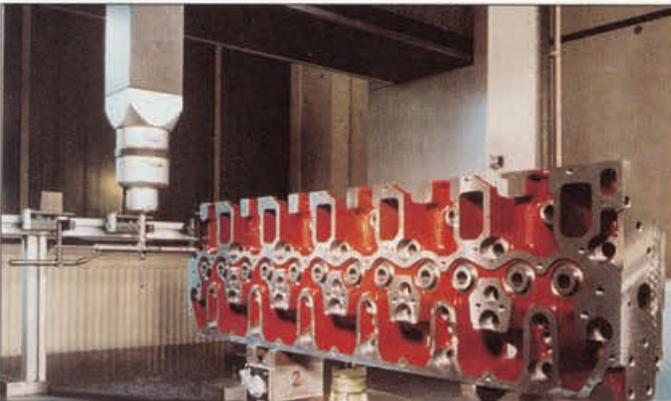
Endgehäuse für einen Großdieselmotor, Werkstoff: GJL-300, Gewicht: 610 kg



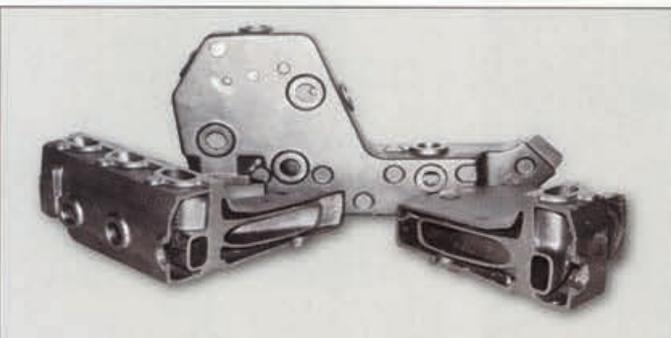
Spiralgehäuse (Ansauggehäuse) für einen Turbolader; Werkstoff: GJL-250, Gewicht: 1,5 t



► Wassergekühlte Abgasrohre aus GJL-250 für einen 18-Zyl.-Großdieselmotor, Stückgewicht: 69 kg



Vermessen eines 840 mm langen Dieselmotor-Zylinderkopfes aus GJL-250, Gewicht: 62 kg



Wassergekühltes Abgasrohr aus niedriglegiertem GJL-150 für einen Schiffsmotor, Gewicht: 24 kg



Zylinderkurbelgehäuse für einen Großdieselmotor; Werkstoff: niedriglegiertes GJL-350, Gewicht: 92,6 kg

Angewandte Vielfalt

Werkzeugmaschinen



Tischrahmen aus GJL-300 für eine Verzahnungsmaschine, Gewicht: 11,5 t



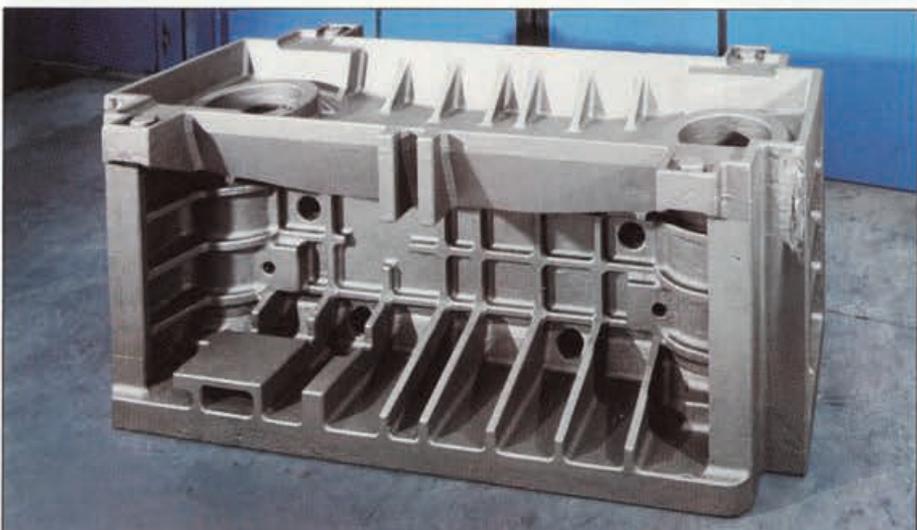
Spindelträger für Mehrspindel-Drehautomat, Gewicht: 140 kg, Werkstoff: ferritisches GJL (Kokillenguß)



Seitenwandständer aus GJL-250 für eine Hochgeschwindigkeits-Fräsmaschine; Abmessungen: 1900 × 800 × 850 mm, Gewicht: 3,5 t



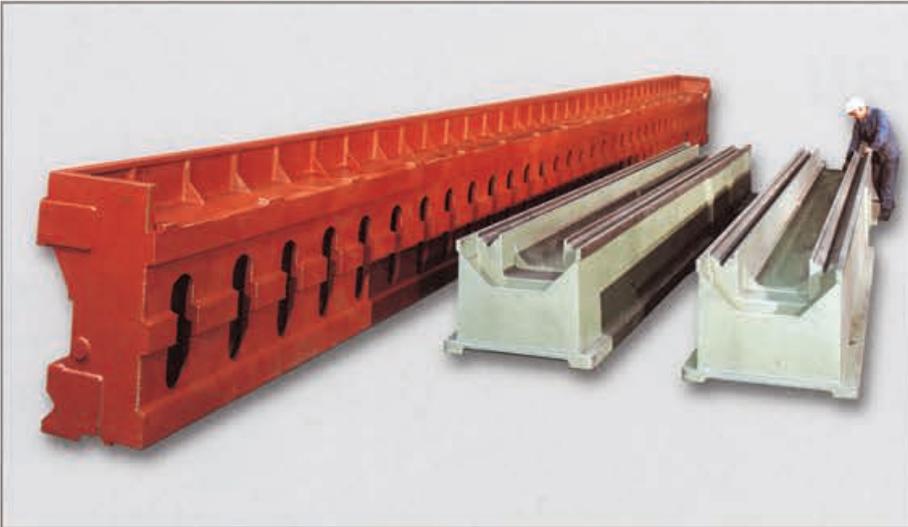
Ständer für eine Fräsmaschine; Werkstoff: GJL-250, Abmessungen: 4510 × 2460 × 1670 mm, Gewicht: 18,5 t



Kopfstück für eine Presse; Werkstoff: GJL-250, Abmessungen: 1900 × 800 × 850 mm, Gewicht: 3,5 t



Spindelstock aus GJL-300 für eine Fräsmaschine, Gewicht: 488 kg



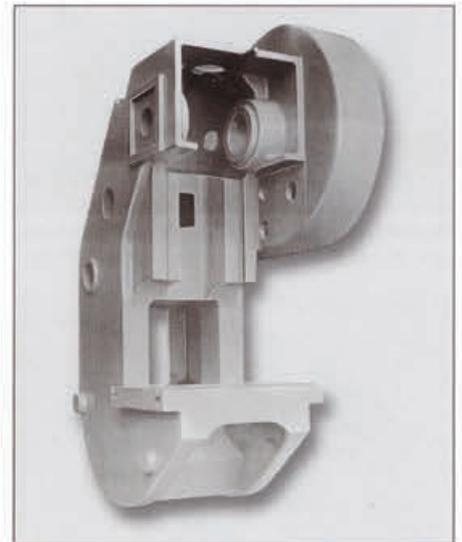
Betten für Werkzeugmaschinen; Werkstoff: GJL-250/-300, Länge: bis 12.800 mm, Gewicht: bis 52,5 t



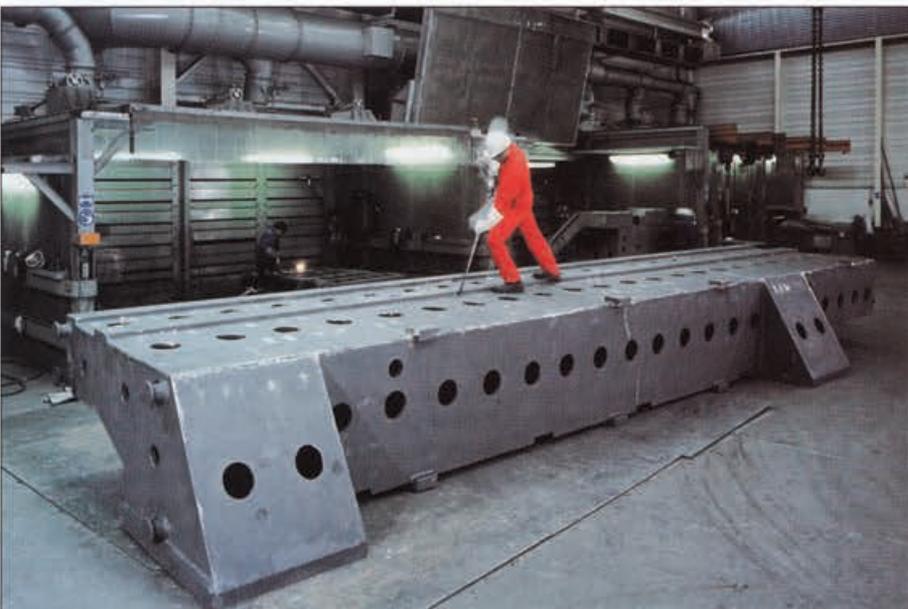
Drehmaschinenbett aus niedriglegiertem GJL-300; Abmessungen: 3120 × 1310 × 1000 mm, Gewicht: 4670 kg



Bei diesem teilmontierten Bett für eine Werkzeugmaschine spielt GJL seine volle Leistungsfähigkeit aus: Freizügigkeit der Gestaltung, günstige mechanische Eigenschaften, hohes Dämpfungsvermögen und Wirtschaftlichkeit.



Pressenständer aus GJL-250, H = 2750 mm, Gewicht: 2300 kg



Querbalken für eine Portalfräsmaschine; Werkstoff: GJL-250, Abmessungen: 10.600 × 2400 × 1100 mm, Gewicht: 27,5 t



Vertikalständer für eine Rundtisch-Schleifmaschine; Werkstoff: GJL-300, Gewicht: 4,2 t, Abmessungen: 2700 × 1060 × 1200 mm

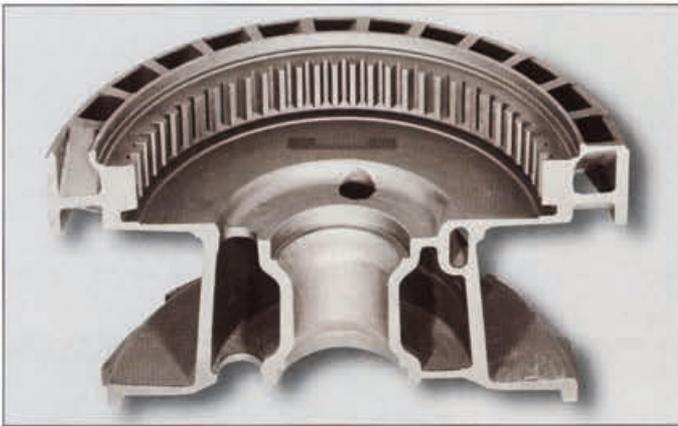
Maschinenbau



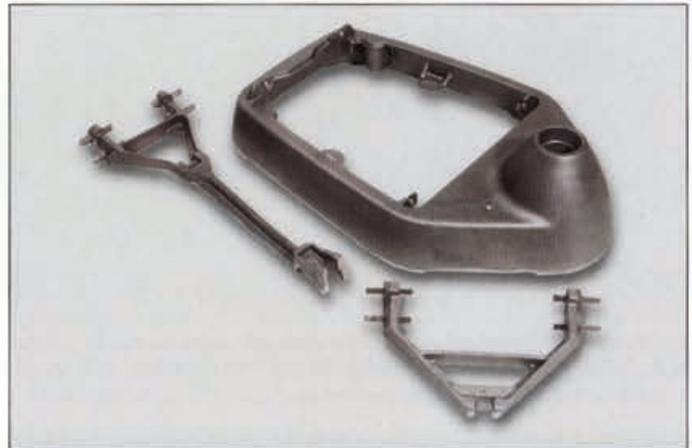
Riemenscheibe aus GJL-250, Abmessungen: $\text{\O} 1410 \times 136$ mm, Gewicht: 520 kg



Palettentische für ein Bearbeitungszentrum; Werkstoff GJL-350, Abmessungen: 1200×1200 mm



Schnitt durch eine Seiltrommel für einen Bagger; Werkstoff: GJL-300, Gewicht: 160 kg, 600 mm Außen- \O



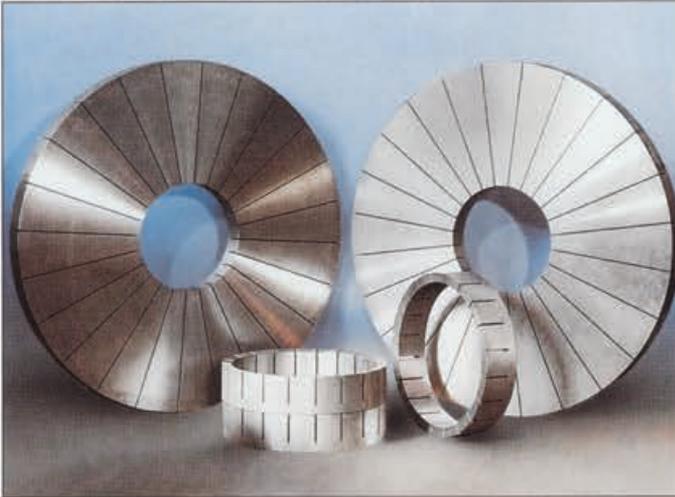
Sockel und Funktionsteile für eine Waage; Werkstoff: GJL-150



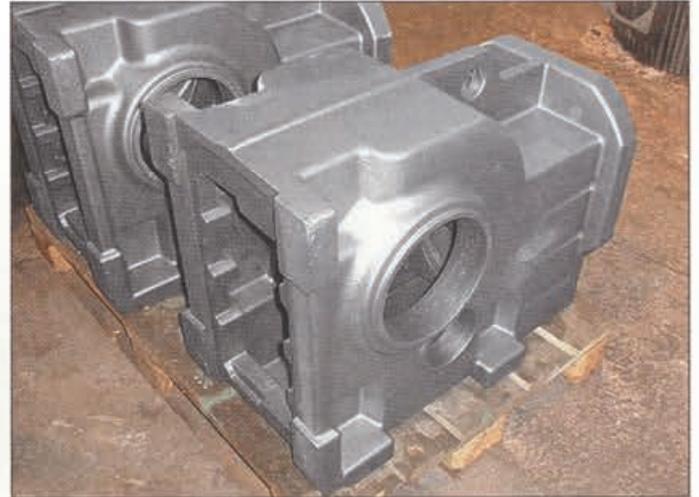
Rahmen für eine Tablettierpresse; Werkstoff: GJL-200, Abmessungen: $1200 \times 1200 \times 350$ mm



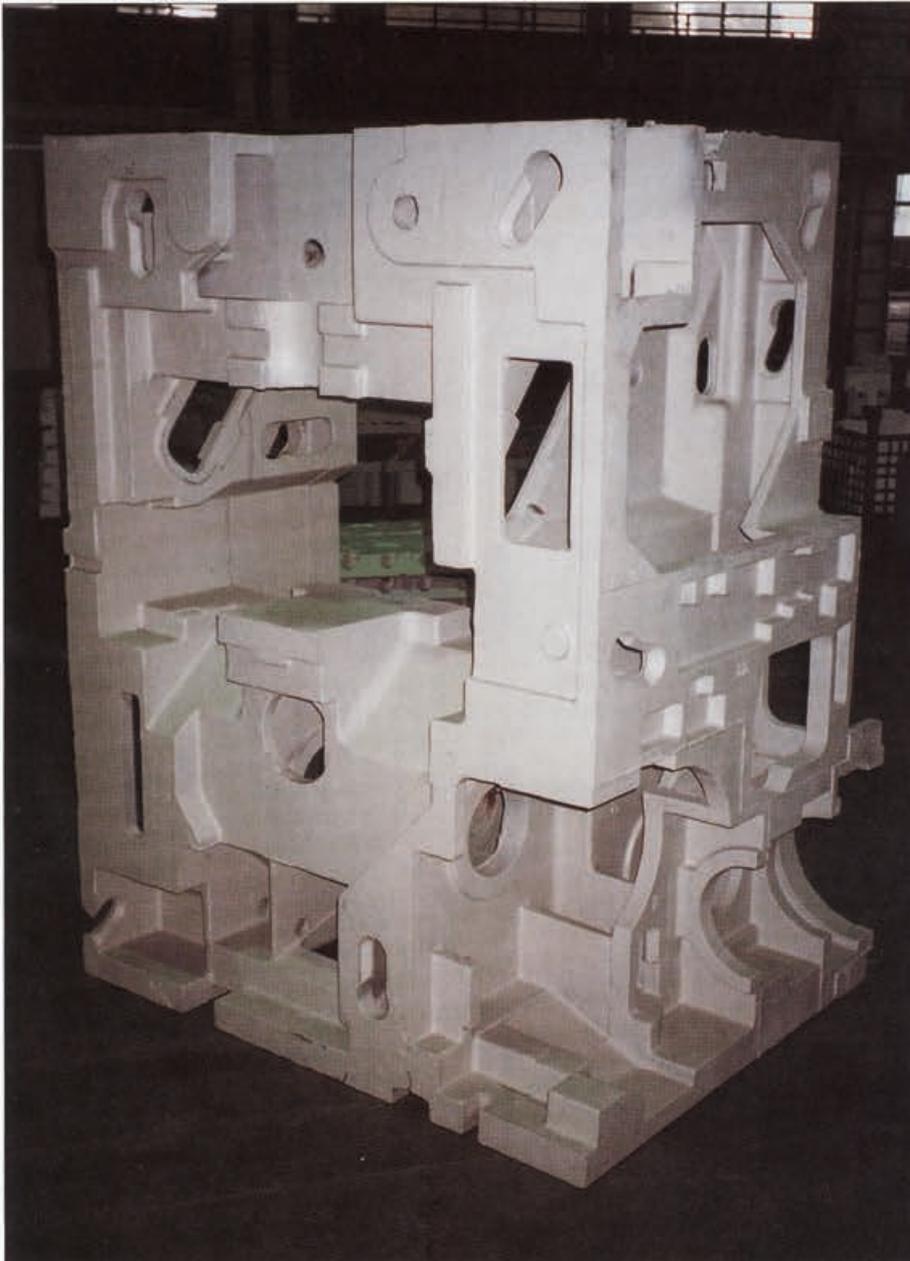
Biegeausgleichsmantel aus GJL-250 für das Glättwerk einer Papiermaschine; Abmessungen: $\text{\O} 980/790 \times 9510$ mm, Gewicht: 17,9 t



Läppscheiben und Lämpfinge aus niedriglegiertem GJL-300, bis 850 mm Ø



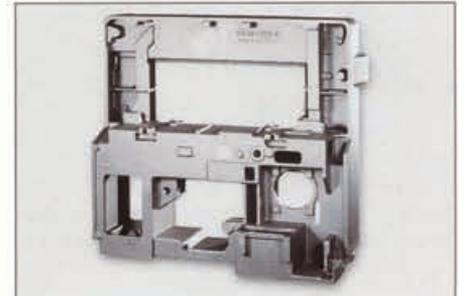
Gehäuse für ein Industriegetriebe; Werkstoff: GJL-250, Gewicht: 260 kg



Maschinenkörper aus GJL-200 für einen Papierschnideautomaten; Abmessungen: 1150 × 875 × 1750 mm, Gewicht: 1580 kg



Steuersegment aus GJL-300 mit fertiggegossenen Zähnen für eine landwirtschaftliche Maschine, Gewicht: 22 kg



Seitenteil für eine Papiermaschine; Werkstoff: GJL-250, Abmessungen: 1820 × 1620 × 720 mm, Gewicht: 790 kg



Ständer aus GJL-200 für eine Lebensmittelmaschine; Gewicht: 1450 kg bei mittleren Wanddicken von nur 15 mm



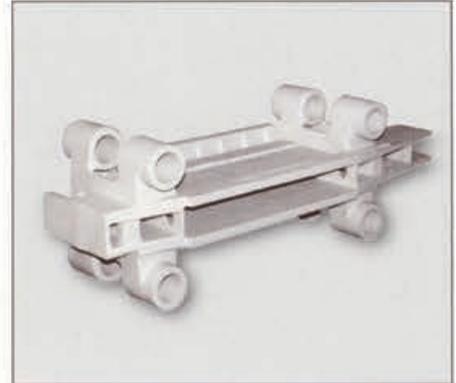
Ständer für eine Portal-Fräsmaschine; Werkstoff: GJL-300, Länge: 8150 mm, Gewicht: 95,4 t



Bauteile aus GJL-250 für einen Scanner für die Bildverarbeitung; Gewicht: 330 kg



Palette (Unterseite) aus GJL-300 für ein Bearbeitungszentrum; Abmessungen: 630 × 630 × 150 mm



Stößel aus GJL-300 für eine Presse; Abmessungen: 2430 × 900 × 750 mm, Gewicht: 1020 kg



◀ Kreuzbett für ein Bearbeitungszentrum; Werkstoff: GJL-250, Abmessungen: 3450 × 2280 × 650 mm, Gewicht: 5,3 t

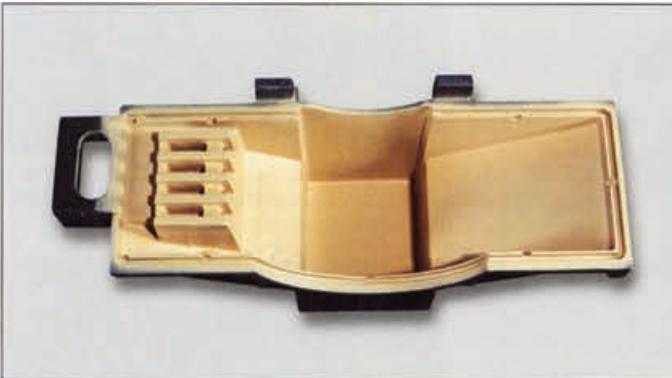
▼ Untersatz für eine Werkzeugmaschine, Werkstoff: GJL-250, Gewicht: 24,6 t



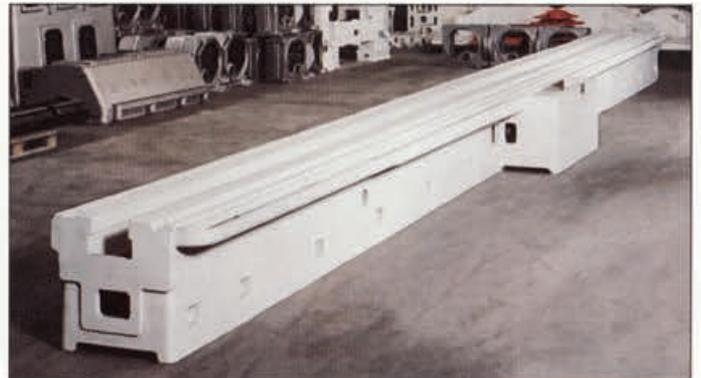


▲ Tisch für eine Presse; Werkstoff: GJL-300, Abmessungen: 2820 × 1160 × 1130 mm, Gewicht: 4,8 t

► Verdichtergehäuse-Oberteil aus GJL-300 für einen Rotationsverdichter; Abmessungen: 4600 × 4200 × 2200 mm, Gewicht: 37,2 t



Gehäuse aus GJL-200 für eine Textilmaschine; Abmessungen: 620 × 290 × 255 mm, Gewicht: 48 kg



Maschinenbett für eine Schleifmaschine; Werkstoff: GJL-250, Abmessungen: 13300 × 765 × 1230 mm, Gewicht: 14,4 t



◀ Lagergehäuse (Konverter) für ein Wälzlager; Werkstoff: GJL-350, Gewicht: 10,4 t

▼ Standsäule mit Gehäuse für einen Operationstisch; Werkstoff: GJL-200, Gewicht: 44,2 t





Bearbeitete und mit peripheren Bohrungen versehene Walzen für einen Papierkalandrier; Werkstoff: GJL-250, Abmessungen: $\varnothing 850/475 \times 9300$ mm, Gewicht: 19,4 t



Wasserpumpengehäuse aus GJL-200 für eine Baumaschine, Gewicht: 16 kg



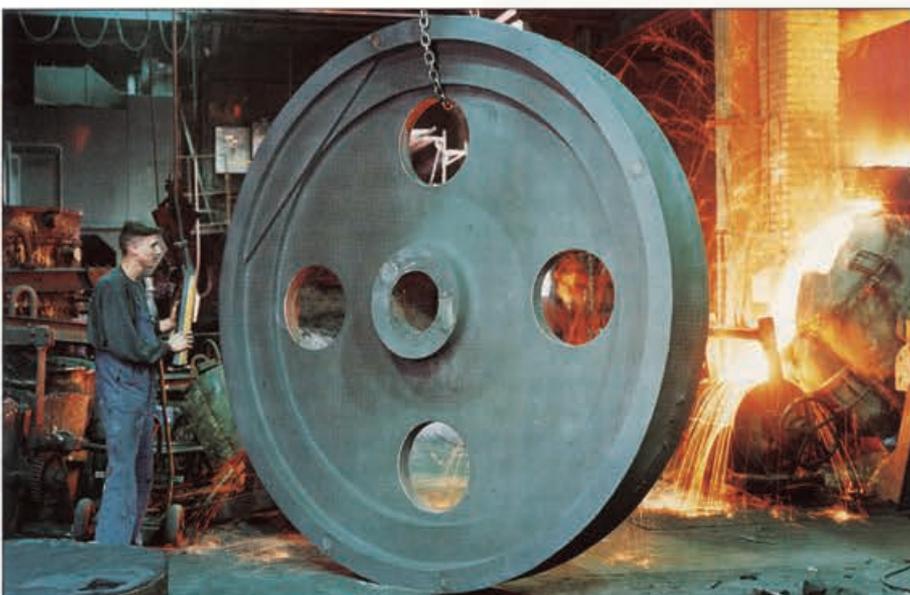
Lagergehäuse mit integrierten Hydraulik- und Schmierölkkanälen; Werkstoff: GJL-250, Gewicht: 15,0 kg



Gehäuse für einen Verdichter, Werkstoff: GJL-350, Gewicht: 3,75 t



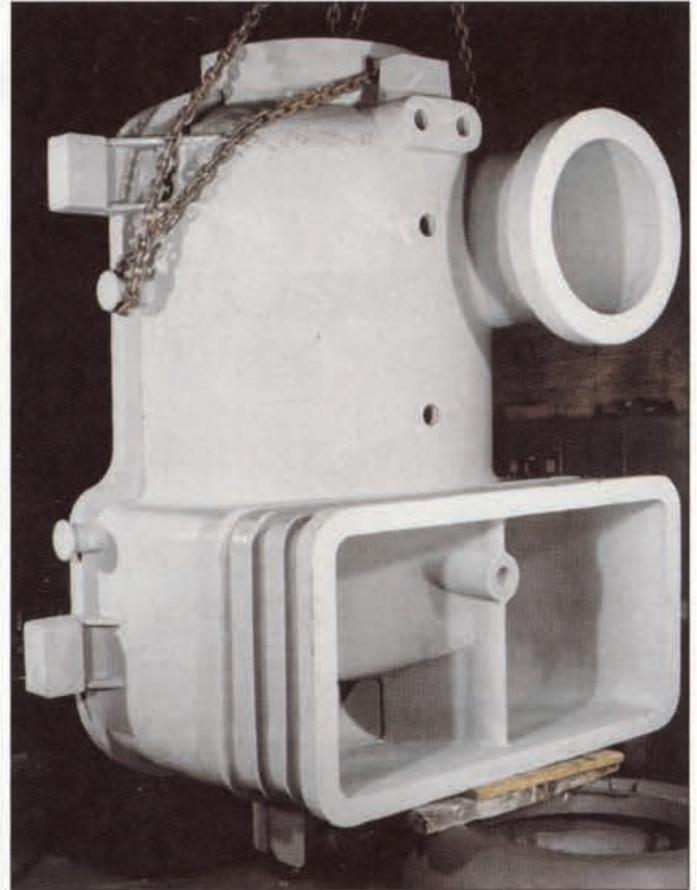
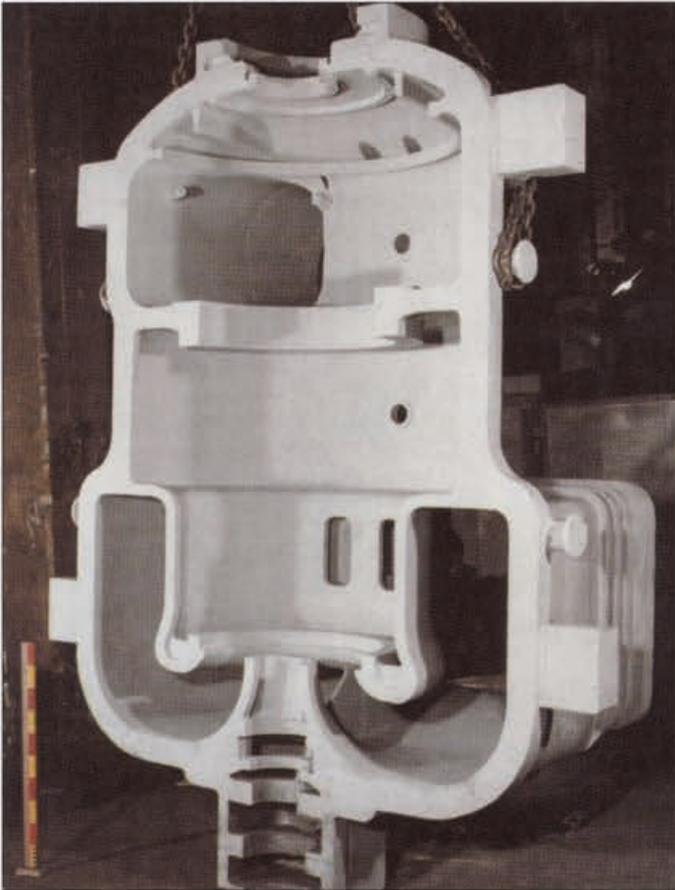
Axiale Spaltrohrmotorpumpe DN 1200 mit Gehäuse auf Laufrolle aus GJL-250



Antriebs- bzw. Schwungrad für einen Keilriemenantrieb; Werkstoff: GJL-300, 2850 mm \varnothing



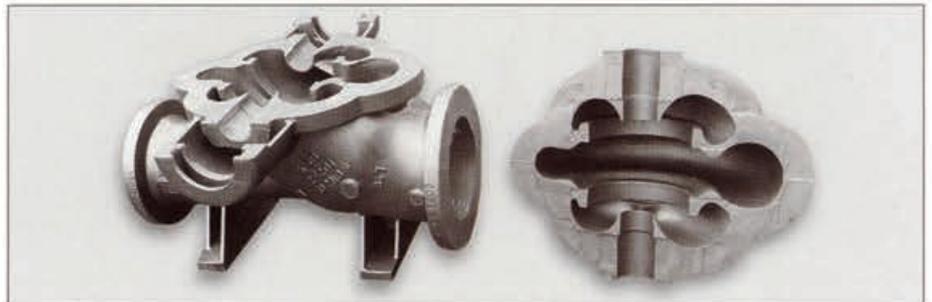
Portal für eine Erodiermaschine; Werkstoff: GJL-250, Abmessungen: 1125 \times 1400 \times 1450 mm, Gewicht: 1214 kg



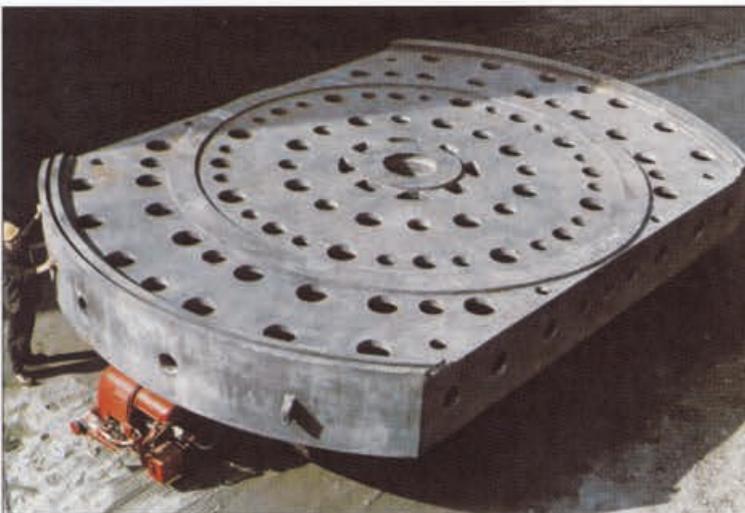
Verdichtergehäuse aus GJL-200, links = Unterteil, Gewicht: 6,6 t, rechts = Oberteil, Gewicht: 6,2 t



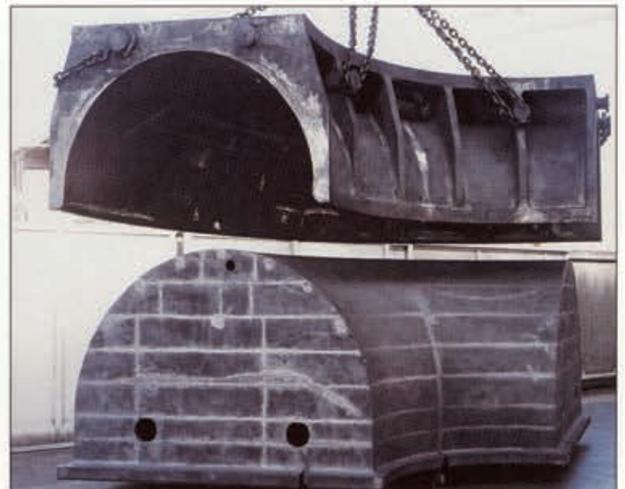
Gehäuse aus GJL-200 für einen Verdichter, Gewicht: 2,7 kg



Pumpengehäuse aus GJL-300 (niedriglegiert) mit Stückgewichten von 362 bzw. 144 kg

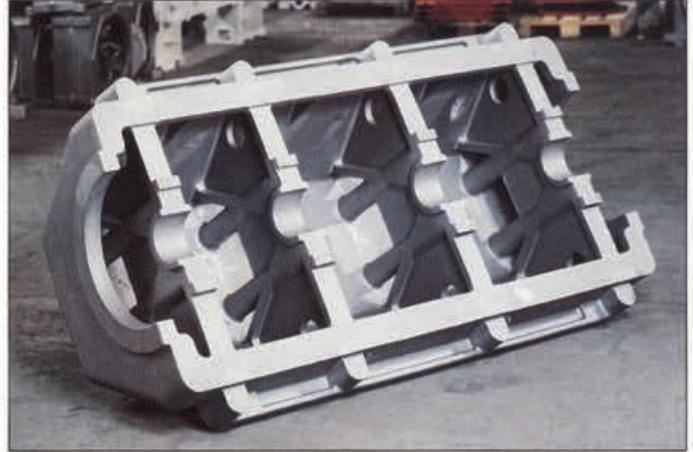
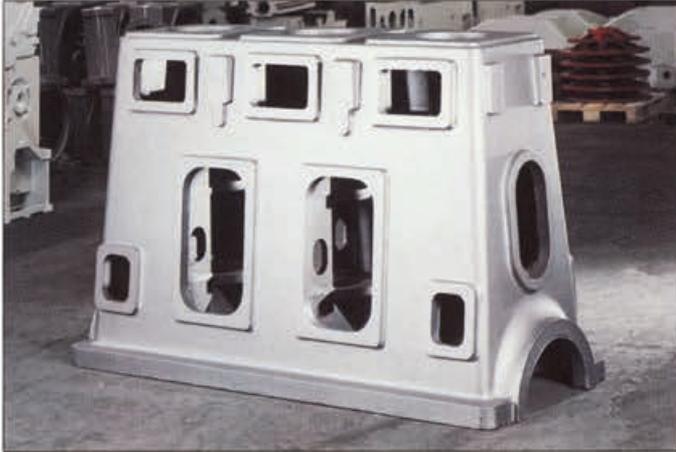


Planscheiben-Mittelstück für eine Karussell-Drehmaschine; Werkstoff: GJL-300, Abmessungen: $\varnothing 8000 \times 800$ mm, Gewicht: 70,5 t

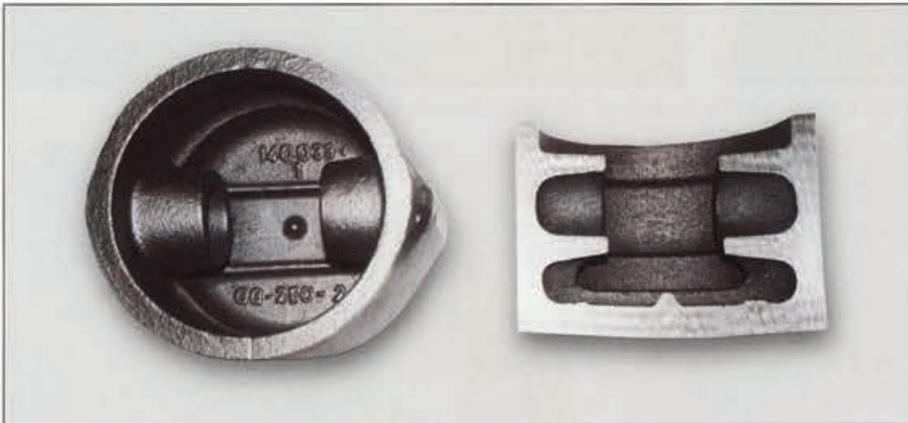


Umformwerkzeug zum Heißverformen von Kraftwerksrohren; Werkstoff: GJL-250, Gewicht Matrize: 40 t, Gewicht Stempel: 32 t

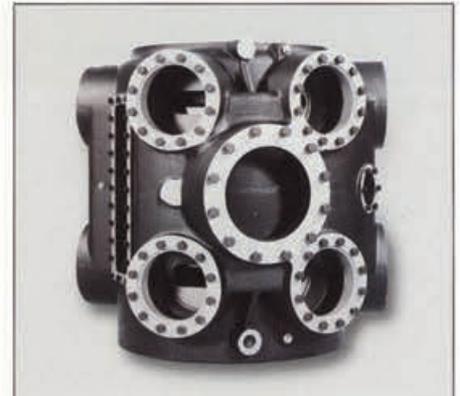
Pumpen und Verdichter



Kurbelgehäuse aus GJL-250 für einen dreistufigen Verdichter; links = Oberteil, 2320 × 1000 × 1520 mm, 2830 kg; rechts = Unterteil, 2320 × 1000 × 820 mm, 1530 kg



Kolben (Ansicht und Schnitt) aus GJL-250 für einen Kompressor, Gewicht: 5,7 t



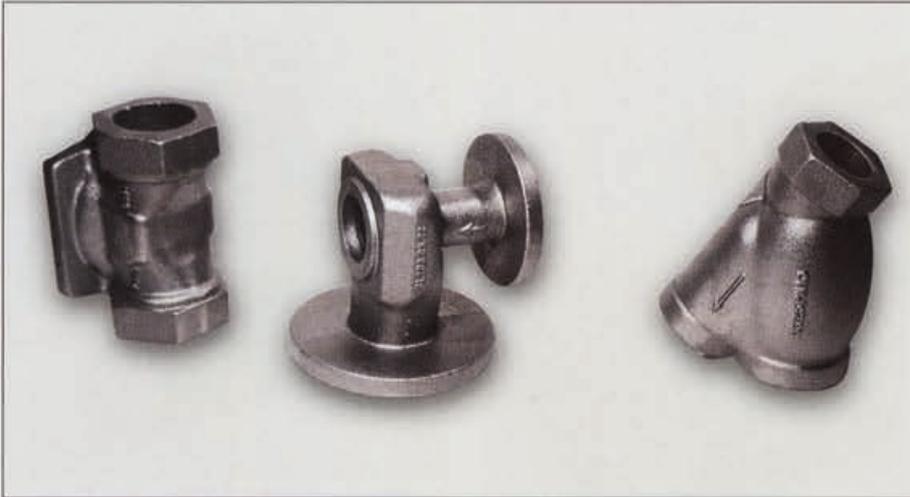
Zylinder aus GJL-250 für einen wassergekühlten Kolbenkompressor, Gewicht: 3,9 t



Gehäuse aus GJL-300 für eine Schneckenpumpe, Gewicht: 38,5 kg



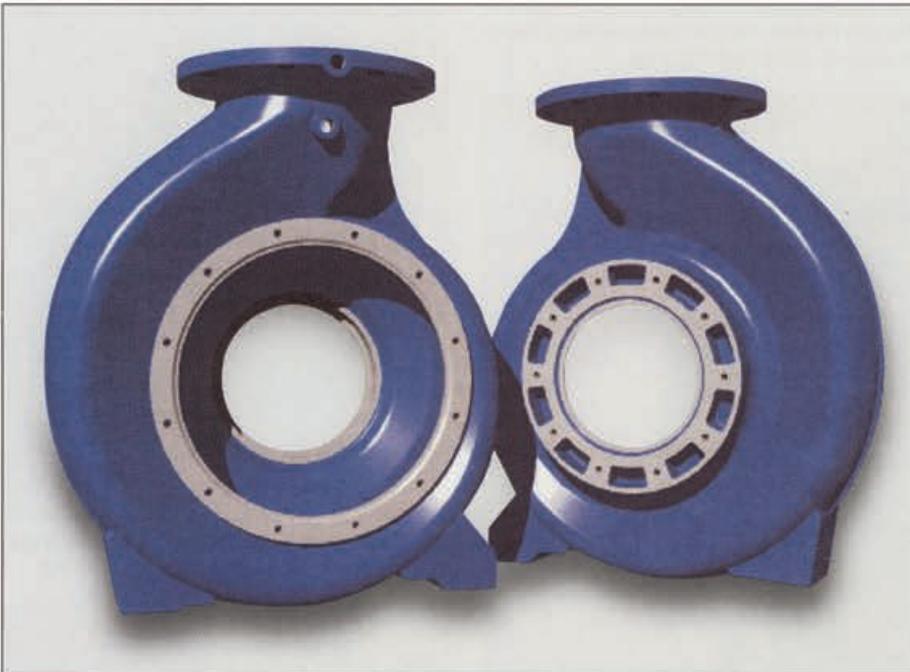
Saugseitenplatte für einen Verdichter; Werkstoff: GJL-250, Abmessungen: 730 × 465 × 330 mm, Gewicht: 140 kg



Armaturengehäuse aus GJL-250 mit Stückgewichten von 1,3 bis 4,62 kg



Seitenschild aus GJL-200 für eine Flüssigkeitsring-Vakuumpumpe, Gewicht: 1700 kg



Gehäuse für Umwälzpumpen; Werkstoff: GJL-200, Stückgewicht: 96 kg



Lauftrad aus GJL-250 für eine Pumpe, Gewicht: 27,5 kg



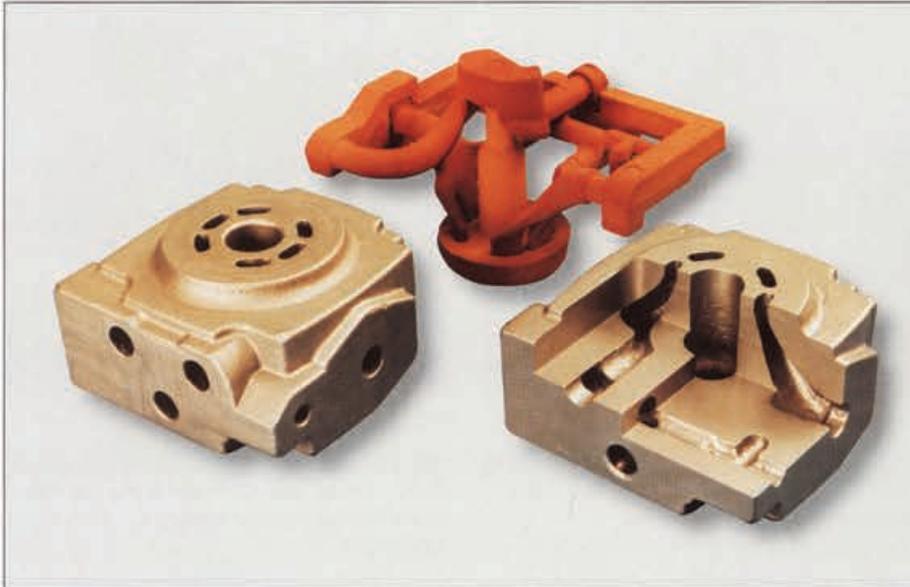
Gehäuse aus GJL-300 für eine Wasserpumpe, Gewicht: 143 kg



Armaturenbauteile aus GJL-200 und -250 mit Stückgewichten von 4,5 bis 8,3 kg



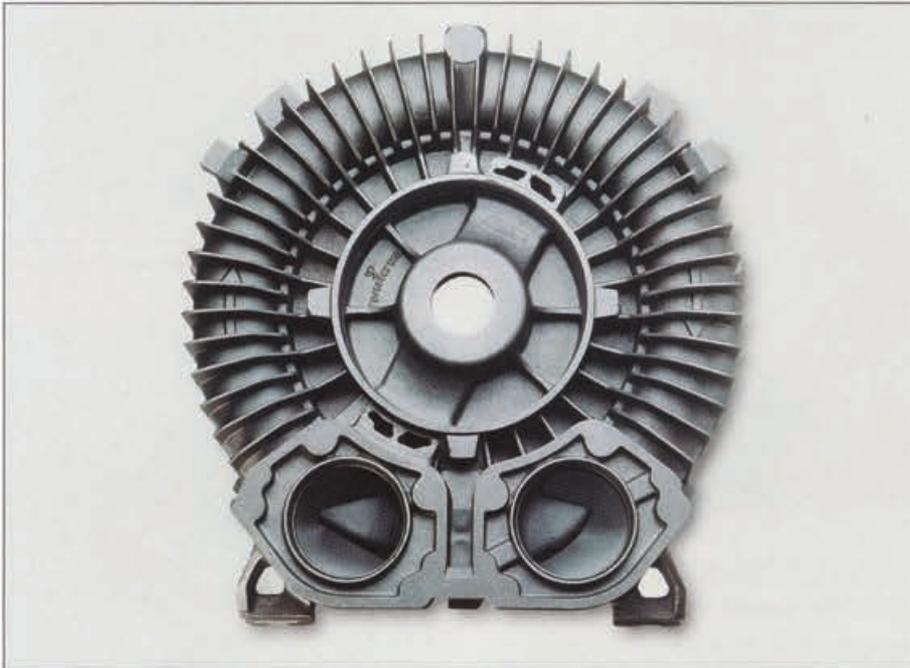
Rohrkopf mit Rückschlagklappe, komplett montiert; Werkstoff: GJL-250, Gewicht: 312 kg



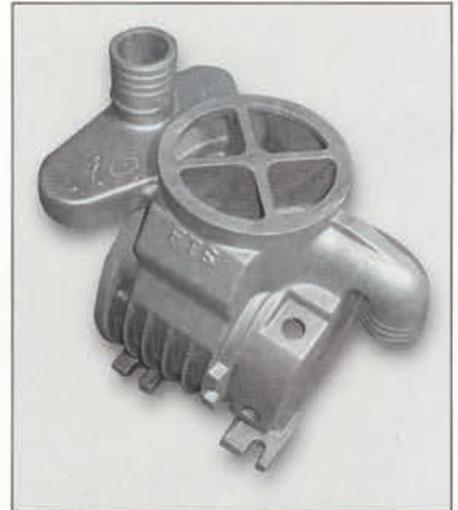
Hydraulik-Steuergehäuse, von links: Ansicht, für die Innenkonturen notwendiger Kern und Schnitt; Werkstoff: GJL-300 (niedrig NiCu-legiert), Gewicht: 10,2 kg



Gehäuse aus GJL-250 für einen Schraubenverdichter; Abmessungen: 420 × 345 × 430 mm, Gewicht: 136 kg



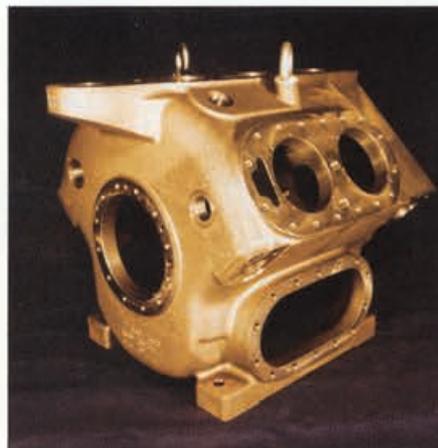
Pumpengehäuse aus GJL-200, 650 mm Ø, Gewicht: 59 kg



Gehäuse aus GJL-200 für eine Kläranlagen-Abwasserpumpe, Gewicht: 49 kg



Ventilgehäuse aus GJL-250, Gewicht: 199 kg



Kompressorgehäuse aus GJL-250, Gewicht: 440 kg



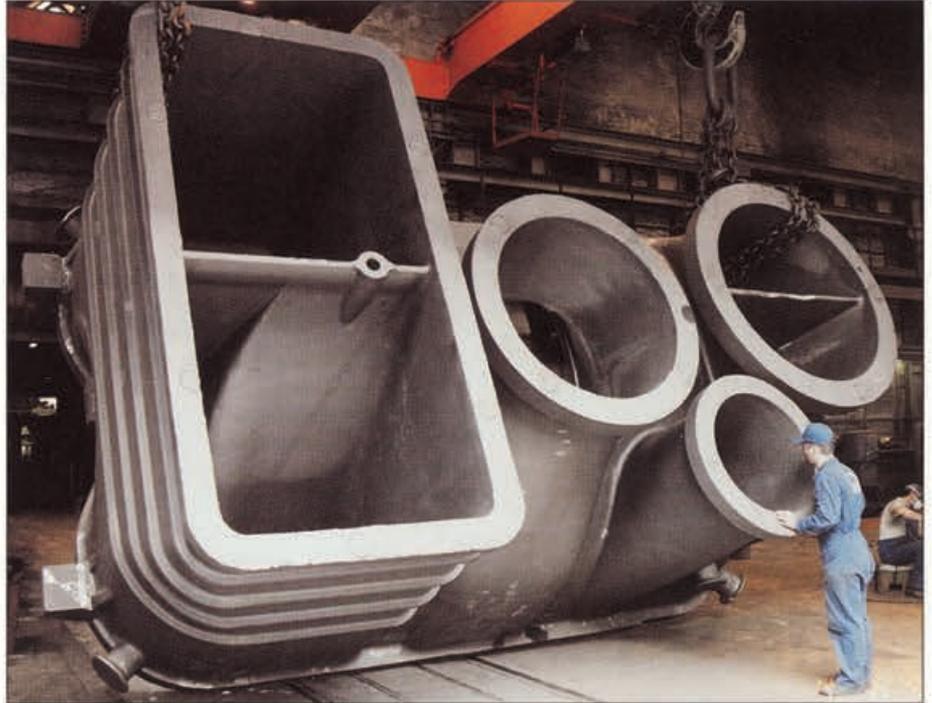
Gehäuse aus GJL-250 (niedrig Ni-legiert) für eine Tauchpumpe, Gewicht: 72 kg



Gehäuse für einen Schraubenverdichter;
Werkstoff: GJL-250, Abmessungen: 920
× 580 × 620 mm, Gewicht: 380 kg



◀ Zylinderblock aus GJL-250
für einen Gasverdichter,
Gewicht: 3,5 t



Gehäuse aus GJL-200 für einen Kom-
pressor, Gewicht: 51,5 t



Füllventil für eine Hochdruckpresse;
Werkstoff: GJL-350, Abmessungen: Ø 250
× 520 mm, Gewicht: 82,5 kg



Zylinderlaufbuchsen für Kolbenkompressoren; Werkstoff: niedriglegiertes GJL-300,
bis 420 mm Innen-Ø und 1200 mm Länge



Gehäuse aus GJL-250 für einen Schrau-
benverdichter, Gewicht: 628 kg



Pumpengehäuse aus niedriglegiertem
GJL-200, Gewicht: 73,5 kg

Weitere Einsatzgebiete



Absperrschieber aus GJL-250 für einen Abwasserkanal, Abmessungen: 1500 × 1500 mm



Doppelziehwerkzeug für Pkw-Türen bestehend aus (von links) Stempel (Gewicht: 7 t), Blechhalter (9 t) und Matrize (12 t), Werkstoff: niedrig CrMo-legiertes GJL-250



Getriebegehäuse aus GJL-300, Abmessungen: 500 × 500 × 350 mm, Gewicht: 62,5 kg



Rahmen aus GJL-250 für ein Preßwerkzeug, Gewicht: 3,1 t



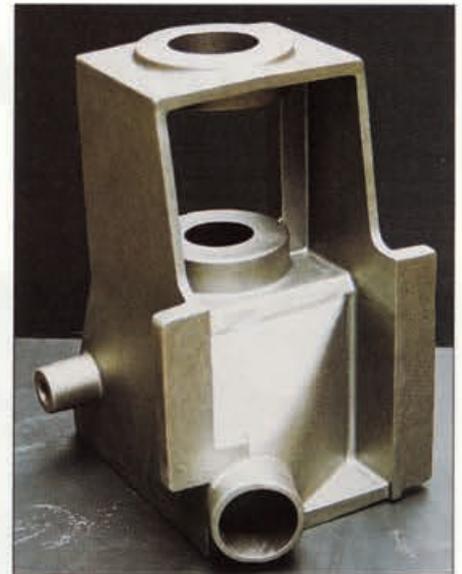
Komplett montiertes, geteiltes Stahlgewehäuse aus GJL-250 zum Einbau von Rollen- oder Kugellagern



Erdergehäuse aus GJL-300 für SF₆-isolierte Hochspannungsschaltanlage, Gewicht: 32 kg



Reaktor aus GJL-250 für die Aufbereitung von Schwefelsäure



Gehäuse aus GJL-250 zur Aufnahme von Schneckengetriebe und Antriebsmotor einer Abwasserleitung

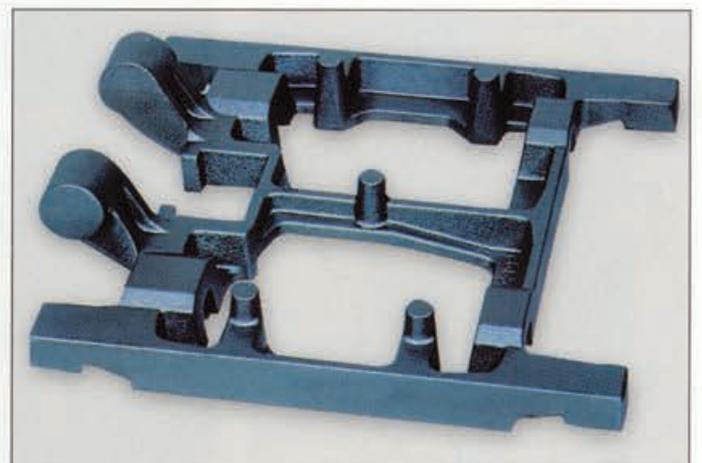
▼ Hinterachsgehäuse aus GJL-250 für einen Traktor, Gewicht: 143,4 kg



► Schaltgehäuse (geschnitten) für den Filterbau; Werkstoff: GJL-250, Gewicht: 157 kg



Schalt- und Steuergehäuse aus GJL-250 für eine Baumaschine, Gewicht: 221 kg



„Zange“ aus GJL-200 für eine Nahrungsmittelmaschine, Gewicht: 16 kg

Bau- und Haustechnik



Bodenabläufe (teilgeschnitten) DN 70 und DN 100 mit Preßdichtungsflansch und herausnehmbarem Geruchverschluss, vollständig aus GJL-200 bestehend



Je nach Einbaustelle werden Straßenabläufe aus GJL-250 oder -300 in den unterschiedlichsten Konstruktionen mit Belastungen von 15 bis 900 kN hergestellt



Baumroste aus GJL-200 überkragen freitragend die Baumscheibe und verhindern eine Bodenverdichtung



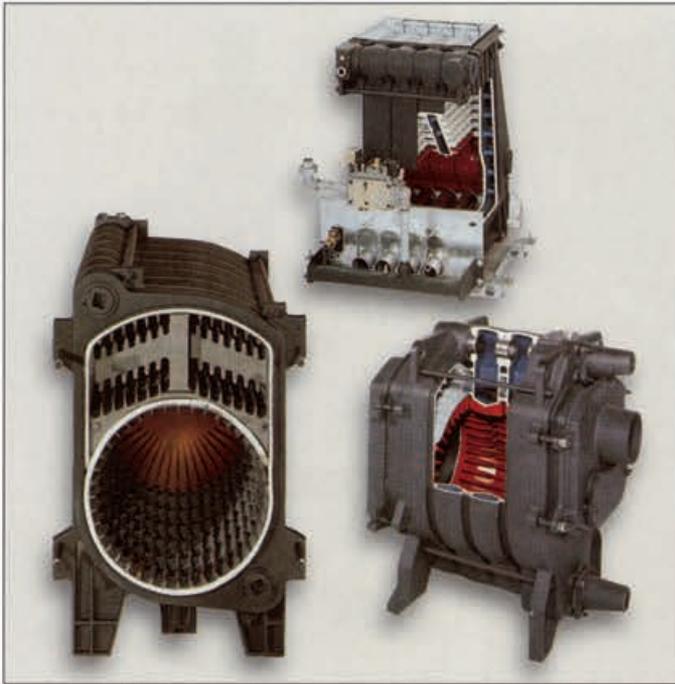
Kippbratpfannen aus GJL-200 werden in Großküchen sowohl in emailliertem Zustand als auch mit „roher“ Oberfläche eingesetzt



Getriebegehäuse aus GJL-250 für den motorischen Antrieb einer Absperrklappe im Wasserleitungsbau



Bodenabläufe aus GJL-200, Schnittmodelle, selbstschließend oder mit Handschieber versehen



Gas- und Ölheizkessel mit Kesselgliedern aus Gußeisen mit Lamellengraphit



Zierstäbe aus GJL-200 nach originaletem historischem Modell



Dreiteilige Straßenschachtabdeckung aus GJL-250, Deckel mit Beton ausgegossen



Aus 57 Einzelteilen bestehende gotische Pumpe, Werkstoff: GJL-200



Freistehende Badewannen – sog. Löwenwannen – aus porzellanemailliertem GJL kennzeichnen hervorragendes Schall- und Wärmeverhalten, dauerhaft farbechter Tiefenglanz und kratzfeste Oberfläche



Straßenschachtabdeckung aus GJL-250 mit eingegossenem Stadtwappen von Rostock



Brückengeländer mit Säulen und Verbindungselementen aus GJL-250, sog. Kaiser-Wilhelm-Balustrade



Rahmen aus GJL-250 für einen Konzertflügel



260 Durchbrüche, ein Gewicht von 3,9 Gramm und eine Spannweite von 59 Millimetern hat diese gußeiserne Brosche, die nach einem Modell der Königlich Preußischen Eisengießereien von 1821 gegossen wird



Aus Rahmen und Deckel bestehende Schachtabdeckung mit eingegossenem Wappen der Stadt Heide, Werkstoff: GJL-200

Schrifttum

- [1] Horstmann, D.: Das Zustandsschaubild Eisen-Kohlenstoff. Verlag Stahleisen, Düsseldorf, 5. Aufl. 1985
- [2] Czikel, J., u. H. Köchling: Über das Lunkerverhalten von grauem Gußeisen. Freiburger Forschungshefte (1958) B 30-II, S. 12 bis 21
- [3] Patterson, W., u. W. Koppe: Das spezifische Volumen von Eisen-Kohlenstoff-Silizium-Legierungen. Gießerei, techn.-wiss. Beih. 14 (1962) 4, S. 213 bis 224
- [4] Siefer, W.: Grauguß - die graue Maus unter den (gegossenen) Werkstoffen? Z. konstruieren + giessen 21 (1996) 4, S. 4 bis 15
- [5] Röhrig, K.: Niedriglegierte Gußeisenwerkstoffe. Gießerei-Praxis (1982) 1/2, S. 1 bis 6
- [6] Röhrig, K.: Niedriglegierte graphitische Gußeisenwerkstoffe - GG, GGV und GGG - Eigenschaften und Anwendung. Z. konstruieren + giessen 12 (1987) 1, S. 29 bis 47
- [7] Thwaites, C. J.: Pratique des fontes avec additions d'étain. Fond. Belge (1966), S. 43 bis 51
- [8] Moscy, A.: Mechanische und technologische Eigenschaften eines niedriglegierten Gußeisens. Öntöde (1967) 6, S. 121 bis 126
- [9] Gundlach, R. B., J. F. Janowak, S. Béchet und K. Röhrig: On the Problems with Carbide Formation in Gray Cast Iron. In: The Physical Metallurgy of Cast Iron. North Holland, USA, 1985
- [10] Motz, J. M.: Zur Normung von Gußeisen mit Lamellengraphit (Grauguß). Z. konstruieren und giessen 15 (1990) 1, S. 4 bis 13
- [11] Heller, P. A., u. H. Jungbluth: Die chemische Zusammensetzung des grauen Gußeisens und seine Zugfestigkeit. Giesserei 42 (1955) 10, S. 255 bis 257
- [12] Tobias, P., u. G. Brinkmann: Über den Zusammenhang zwischen chemischer Zusammensetzung und den mechanischen Eigenschaften von Gußeisen. Giesserei 29 (1942) 19, S. 317 bis 320 u. 340/41
- [13] Weis, W., u. K. Orth: Einflüsse auf die mechanischen Eigenschaften von Gußeisen mit Lamellengraphit nach Berücksichtigung der durch die chemische Zusammensetzung gegebenen Wirkungen. Giess.-Forsch. 21 (1969) 3, S. 113 bis 124
- [14] DIN 1691, Beiblatt 1: Gußeisen mit Lamellengraphit (Grauguß) - Allgemeine Hinweise für die Werkstoffwahl und die Konstruktion. Ausgabe 1985
- [15] Patterson, W., u. R. Döpp: Einheitliche Bewertung von Gußeisen mit Lamellengraphit. Giesserei 60 (1973) 2, S. 32 bis 39
- [16] Angus, H. T.: Cast iron: Physical and Engineering Properties. Butterworth, London, 2. Auflage 1976
- [17] Nechtelberger, E.: Untersuchungen des Kriechverhaltens von Gußeisen-Werkstoffen unter Zug- bzw. Druckbeanspruchung bei Raumtemperatur. Teil 1: Kriechverhalten von Gußeisen mit Lamellengraphit (GG-15 und GG-30) unter Druckbeanspruchung. Österr. Giesserei-Institut, Bericht A.-Nr. 18.670, Leoben 1973
- [18] Nechtelberger, E., wie [17], Teil 2: Kriechverhalten von Gußeisen mit Lamellengraphit der Sorten GG-15, GG-20, GG-25 und GG-30 unter Zugbeanspruchung, der Sorten GG-20 und GG-25 unter Druckbeanspruchung sowie zweier Hartgußsorten unter Zug- bzw. Druckbeanspruchung. Österr. Giesserei-Institut, Bericht A.-Nr. 20.475, Leoben 1976
- [19] Collaud, A.: Strukturelle Anisotropie, mechanische Eigenschaften und Normung von Grauguß. Giesserei TWB 14 (1954), S. 709 bis 726, TWB 15 (1955), S. 767 bis 799
- [20] Felix, W.: Der Elastizitätsmodul als Hilfsmittel bei der Qualitätsbeurteilung von Gußeisen. Giesserei 50 (1963) 1, S. 6 bis 11
- [21] Grundig, W.: Über den Elastizitätsmodul E_0 der graphithaltigen Eisenwerkstoffe. Giesserei TWB 16 (1956), S. 809 bis 814
- [22] Gilbert, G. N. J.: Behavior of cast iron under stress. Proc. BCIRA Conf. on Engineering Properties and Performance of Modern Iron Castings, Loughborough 1970, S. 41 bis 73
- [23] Schröder, K. H.: Untersuchungen zur Mechanik des Gußeisens. Giess.-Forsch. 22 (1970) 2, S. 51 bis 63
- [24] Sakwa, W., u. W. Bachmacz: Über den Einfluß der Gußhaut auf die Ermüdungsfestigkeit von grauem Gußeisen. Giessereitechnik 14 (1968) 2, S. 37 bis 45
- [25] Johansson, M.: Utmattningshållfastheten hos gjutjärn och gjutstål, IVF-Resultat 72612 (1972), 32 S.
- [26] Hänchen, R.: Dauerfestigkeitsschaubilder für Stahl und Gußeisen. Carl Hanser Verlag, München 1963
- [27] Hänchen, R.: Gegossene Maschinenteile, Berechnung und Gestaltung. Carl Hanser Verlag, München 1964
- [28] Sternkopf, J.: Dynamische Festigkeit langzeitig beanspruchter, dickwandiger Maschinenteile aus Gußeisen. Giessereitechnik 35 (1989) 10, S. 310 bis 315; s. a. Z. konstruieren + giessen 20 (1995) 2, S. 30 bis 38
- [29] Sternkopf, J.: Dauerfestigkeit von Gußeisenwerkstoffen bei Schwingspielzahlen $> 10^7$. Z. konstruieren + giessen 19 (1994) 3, S. 21 bis 35
- [30] Komms, B.: ASTM Proceedings 28 (1928) 2, S. 174 bis 204
- [31] Gilbert, G. N. J., u. K. B. Palmer: The Influence of Surface Rolling on the Fatigue Properties of Flake Graphite and Nodular Graphite Cast Irons. BCIRA J. Research and Development 5 (1954) 8, S. 447 bis 464
- [32] Lahn, A.: Dämpfungsverhalten gegossener Eisen- und NE-Werkstoffe. Referat über eine Arbeit von A. Troost. Giess.-Forsch. 22 (1970) 4, S. 153 bis 159
- [33] Subramanian, S. V., u. A. J. Genualdi: Optimisation of Damping Capacity and Strength in Hypereutectic Gray Cast Iron. Trans. AFS 104 (1996), S. 995 bis 1001; s. a. Z. konstruieren + giessen 23 (1998) 2, S. 29 bis 35
- [34] Galloway, C. D.: Iron Age 166 (1950) 5, S. 75 bis 78
- [35] Timmerbeil, H.: Gußeisen mit Kugelgraphit als Werkstoff für mechanisch-, thermisch- und chemisch (MTC)- beanspruchten Guß. Giesserei 42 (1955) 1, S. 7 bis 15
- [36] Temperguß. Gießerei-Verlag, Düsseldorf 1961; Dt. Übersetzung von „Malleable Iron Castings“, Malleable Founders Society, Cleveland, Ohio
- [37] Gilbert, G. N. J.: The Growth and Scaling Characteristics of Cast Irons in Air Steam. BCIRA Journal 7 (1959) 10, S. 478 bis 566
- [38] Gilbert, G. N. J.: Tin and the Growth and Scaling of Flake- and Nodular-Graphite Cast Iron up to 650 °C. Foundry Trade Journal (1964) Jan., S. 35 bis 45
- [39] Roll, F.: Handbuch der Gießereitechnik, Bd. 1, Teil 1, S. 216 bis 258. Springer-Verlag, Berlin 1960
- [40] Hugony, E.: Aluminiumlegiertes Gußeisen. La Fonderia Italiana 14 (1965) 2, S. 33 bis 48
- [41] Palmer, K. B.: High Temperature Tensile Design Stresses for Cast Irons. BCIRA J. 23 (1975), S. 591 bis 597
- [42] Palmer, K. B.: Creep and Stress-to-Rupture Properties of Eight Unalloyed Cast Irons at 350 °C. BCIRA J. 29 (1981), S. 43 bis 53
- [43] Nechtelberger, E.: Eigenschaften unlegierter und niedriglegierter Gußeisen mit Lamellengraphit, Kugelgraphit, Vermiculargraphit im Temperaturbereich bis 500 °C. Fachverlag Schiele & Schön, Berlin 1977
- [44] Kattus, J. R., und B. McPherson: Report on properties of cast iron at elevated temperatures. ASTM Special Technical Publication Nr. 248, (1959)
- [45] Röhrig, K.: Temperaturwechselverhalten von Gußeisen. Z. konstruieren + giessen 2 (1977) 3, S. 3 bis 21
- [46] Röhrig, K.: Temperaturwechselverhalten von Gußeisenwerkstoffen. Gießerei-Praxis (1978) 23/24, S. 375 bis 392
- [47] Röhrig, K.: Thermal Fatigue of Gray and Ductile Irons. AFS Trans. 76 (1978), S. 75 bis 88
- [48] Gundlach, R. B.: Temperaturwechselbeständigkeit von legierten Gußeisen mit Lamellengraphit für Bauteile von Dieselmotoren. Gießerei-Praxis (1981) 6, S. 97 bis 107
- [49] Rickards, P. J.: Low Temperature Properties of Cast Irons. In: Engineering Properties and Performances of Modern Iron Castings. University of Technology, Loughborough, England, 7. - 9.4.1970
- [50] Parent-Simonin, S., u. P. Borel: Quelles fontes choisir aux basses températures? Fonderie-Fondeur d'aujourd'hui (1984) 38, S. 11 bis 22
- [51] Gilbert, G. N. J.: Properties of Cast Iron at Sub-atmospheric Temperatures. Inst. Brit. Foundrym. 47. Annual Meeting, (1950), Reprint 964, S. 1 bis 24
- [52] Matting, A., u. U. Krüger: Ermittlung der mechanischen Eigenschaften von Gußeisenwerkstoffen bei tiefen Temperaturen. Giesserei-Forschung 22 (1970) 1, S. 29 bis 37
- [53] Patterson, W., u. W. Standke: Bestimmungsverfahren und Größe der Schlagzähigkeit von Gußeisen mit Lamellengraphit. Giesserei-Forschung 21 (1969) 1, S. 7 bis 17
- [54] Friedrich, W.: Beitrag zur Beurteilung des Schlagbiegeverhaltens von Gußeisen bei tiefen Temperaturen. Werkstatt und Betrieb 101 (1968) 8, S. 449 bis 452
- [55] Gilbert, G. N. J.: The Impact Properties of Flake Graphite Cast Irons. BCIRA J. 5 (1954) 6, S. 298 bis 317
- [56] Zerbst, U., C. Wiesner, M. Cokak u. L. Hodulak: SINTAP: Entwurf einer vereinheitlichten Fehlerbewertungsprozedur - eine Einführung. GKSS-Bericht 99/E/65, GKSS Forschungszentrum Geesthacht, 1999
- [57] Pusch, G.: Beanspruchungsgerechte Bauteilbewertung mit Hilfe bruchmechanischer Methoden. Z. konstruieren + giessen 23 (1998) 2, S. 20 bis 27
- [58] Henke, F.: Die Bruchzähigkeit von Gußeisen-Werkstoffen. Gießerei-Praxis. (1976) 9/10, S. 131 bis 139
- [59] Grüter, L.: Bruchzähigkeit von Gußeisen mit Lamellengraphit. Giesserei-Forschung 29 (1977) 2, S. 47 bis 51
- [60] Hornbogen, E. u. J. Motz: Über die Bruchzähigkeit von graphithaltigen Eisen-Kohlenstoff-Gußwerkstoffen. Giess.-Forschung 29 (1977) 4, S. 115 bis 120
- [61] Speidel, M. O.: Bruchzähigkeit und Ermüdungs-Rißwachstum von Gußeisen. Z. Werkstofftechnik 12 (1981) 11, S. 387 bis 402
- [62] Bowe, K. H., E. Hornbogen u. St. Stanzel: Definition, Messung und Anwendung bruchmechanischer Kennwerte von grauem Gußeisen. Z. konstruieren + giessen 11 (1986) 2, S. 23 bis 32
- [63] Wojnar, L.: Der Einfluß des Gefüges und der Temperatur auf das Bruchverhalten von Gußeisen mit Lamellen- und Kugelgraphit. Gießereitechnik 36 (1990) 4, S. 105 bis 108

- [64] Just, C., G. Kaiser, M. Schmidt u. M. Zaiczek: Rißausbreitungswiderstand von legiertem Gußeisen mit Lamellengraphit unter statischer und schwingender Beanspruchung. *Gießereitechnik* 36 (1990) 4, S. 108 bis 111
- [65] Höner, K. E., u. R. Gagnaux: Untersuchungen an Bruchproben aus Gußeisen mit Lamellengraphit, Gußeisen mit Kugelgraphit und schwarzem Temperguß. *Gießerei-Praxis* (1977) Nr. 6/7, S. 90 bis 99
- [66] Wolfensberger, S.: Bruchzähigkeit von Gußeisen. Dissertation, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, 1986
- [67] Wolfensberger, S., P. Uggowitzer u. M. O. Speidel: Die Bruchzähigkeit von Gußeisen. – Teil I: Gußeisen mit Lamellengraphit. *Giess.-Forschung* 39 (1987) 1, S. 17 bis 24
- [68] Komber, B.: Bruchmechanische Bewertung des Rißausbreitungsverhaltens ferritischer Gußeisenwerkstoffe bei zyklischer Beanspruchung. Dissertation, TU Bergakademie Freiberg, 1995
- [69] Grüter, L.: Rißausbreitung in Gußeisen. Dissertation, Ruhruniversität Bochum, 1975
- [70] Pusch, G., O. Liesenberg u. B. Bilger: Beitrag zur bruchmechanischen Bewertung des Rißausbreitungsverhaltens von Gußeisen bei zyklisch-mechanischer Beanspruchung. *Gießereitechnik* 34 (1988) 3, S. 77 bis 81
- [71] Speidel, M. O., u. B. Scarlin: In: *Materialkunde – Techn. Reihe 3, Gefüge und Bruch*. Bornträger, Stuttgart 1977
- [72] Gilbert, G. N. J.: *BCIRA-Journal*, Report 1285 (1977), S. 598 bis 613
- [73] Dietrich, H.: Magnetische Eigenschaften von Eisen-Kohlenstoff-Gußlegierungen. *Gieserei, techn.-wiss. Beihefte* 14 (1962) 2, S. 79 bis 91
- [74] Richter, F.: Einfluß des Grundgefüges auf die physikalischen Eigenschaften von Gußeisen mit Kugelgraphit GGG-40 – Teil 1. *Giess.-Forschung* 37 (1985) 3, S. 97 bis 102
- [75] Hemminger, W., u. F. Richter: Einfluß des Grundgefüges auf die physikalischen Eigenschaften von Gußeisen mit Kugelgraphit GGG-40 – Teil 2. *Giess.-Forschung* 38 (1986) 4, S. 133 bis 136
- [76] Richter, F., W. Hemminger u. E. Hanitzsch: Physical properties of the flake graphite cast irons „GGK-F“ and „GGK-F-NiMo“ between 20 and 500 °C. *Giess.-Forschung* 41 (1989) 2, S. 77 bis 85
- [77] Subramanian, S. V., u. A. J. Genualdi: Überreutektisches Gußeisen mit Lamellengraphit mit hoher Dämpfungsfähigkeit und Festigkeit. *Gießerei-Praxis* (1998) 4, S. 137 bis 144
- [78] Keiner, W., u. H. Werning: Hochgekohlter Grauguß GG-15 HC – Idealer Werkstoff für Bremscheiben und Bremstrommeln. *Z. konstruieren + giessen* 15 (1990) 4, S. 4 bis 14
- [79] Kuchling, H.: *Taschenbuch der Physik*. Verlag Harri Deutsch, Frankfurt/M. 1979
- [80] Sternkopf, J.: Dynamische Festigkeit langfristig beanspruchter, dickwandiger Maschinenteile aus Gußeisen. *Z. konstruieren + giessen* 20 (1995) 2, S. 30 bis 38
- [81] Liesenberg, O., u. D. Wittekopf: Stahlguß- und Gußeisenlegierungen. *Dtsch. Vlg. f. Grundstoffindustrie* Leipzig 1992, S. 183 u. 184
- [82] Uetz, H.: Grundfragen des Verschleißes im Hinblick auf neuere Erkenntnisse auf dem Gebiet der Verschleißforschung. *Braunkohle – Wärme und Energie* 20 (1968) 11, S. 365 bis 376
- [83] Czichos, H.: Systematische Analyse und Beschreibung von Verschleißvorgängen. *Z. Metallkunde* 71 (1980) 7, S. 421 bis 426
- [84] Wahl, W.: Grundlagen des mechanischen Verschleißes. Vortrag auf der Fachtagung Instandhaltung, Karlsruhe 1975
- [85] Palmer, S. W.: Was wird von Gußeisenteilen beim Einsatz im Maschinenbau gefordert? In: *Conference on Engineering Properties and Performance of Modern Iron Castings, Proceedings*, Loughborough, 7. – 9.4.1970
- [86] Piwowarsky, E.: *Hochwertiges Gußeisen*. Springer Vlg. Berlin 1951, S. 585 bis 617
- [87] Nikolaev, V. G.: Einfluß des Graphits auf die Eigenschaften von gußeisernen Gleitlagern. *Lifejoe proizvodstvo* (1980) 11, S. 17 u. 18
- [88] Henke, F.: Einflüsse auf das Fressen von Gleitflächen aus Gußeisen. *Gießerei-Praxis* (1975), 20, S. 327 bis 333
- [89] Vorobev, G. M., u.a.: Untersuchung der Neigung von Gußeisen zur Bildung von Aufbauschichten. *Izvestija vyssich ucebnych zavedenij, černaja metallurgija* (1978) 12, S. 114 bis 117
- [90] Mayer, H.: Wärmebehandlung von Gußeisen mit Lamellen- und Kugelgraphit. *Techn. Rundschau Sulzer* 47 (1965) 3, S. 157
- [91] Schaum J. H.: *Trans.-AFS* 56 (1948), S. 265 bis 277
- [92] Vermeiden und Beseitigung von Eigenspannungen in Gußstücken aus Gußeisen mit Lamellengraphit. *VDG-Merkblatt N 1*, 2. Aufl. 1981
- [93] Bühler, H., u. H. G. Pfalzgraf: Untersuchungen über den Abbau von Eigenspannungen in Gußeisen und Stahl durch mechanisches Rütteln und Langzeitlagerung im Freien. *VDI-Forschungsheft* 494, Düsseldorf 1962
- [94] Gilbert, G. N. J.: The Relief by Heat-Treatment of Externally Applied Stresses to Cast Iron. *BCIRA* 3 (1950), S. 499 bis 514
- [95] Sylvester, A. W.: Graphitization of Gray Cast Iron by Heat Treatment. *Trans. AFS* 57 (1949), S. 51 bis 65
- [96] Wiegand, H., u. H. Hentze: Gefügeveränderungen bei der Wärmebehandlung von Eisen-Graphit-Werkstoffen. *Gießerei, Techn.-Wiss.-Beihefte* 12 (1960), S. 1629 bis 1638
- [97] Ferry, M.: *Fonderie* 132, Jan. 1957, S. 15 bis 23
- [98] Allen, A. H.: *Foundry* 77 (1949) Nr. 2, S. 122
- [99] *Gußeisen-Handbuch*. Gießerei-Verlag, Düsseldorf 1963
- [100] Amende, W.: Randschichthärtungen von Gußeisen mit dem Laserstrahl. *Z. konstruieren + giessen* 17 (1992) 1, S. 31 bis 36
- [101] Oldewurtel, A.: Für Großwerkzeuge: Gegossene Werkstoffe und deren Verarbeitung. *Z. konstruieren + giessen* 25 (2000) 1, S. 4 bis 18
- [102] Emde, F.: Umschmelzhärten von Nockenwellen aus Grauguß. *Elektrowärme International* 37 (1979) 6, S. 140 bis 145
- [103] Hiller, W.: Schweißen und thermisches Nachbehandeln von Gußwerkstoffen mit dem Elektronenstrahl. *Gießerei* 63 (1976) 11, S. 316 bis 321
- [104] Amende, W.: Die schmelzmetallurgische Randschichtbehandlung von Gußeisenwerkstoffen mit dem Laserstrahl. *Z. konstruieren + giessen* 20 (1995) 4, S. 26 bis 32
- [105] Hofmann, R.: Neue Erkenntnisse bei der Weiterentwicklung von Gasnitrierverfahren unter besonderer Berücksichtigung des Kurzzeit-Gasnitrierens. *BBC-Wärmebehandlungstagung* am 31.1. und 1.2.1974 in Dortmund.
- [106] Sturm, G.: Nitrieren von Gußeisenwerkstoffen. *Z. konstruieren + giessen* 1 (1976) 1, S. 26 bis 37
- [107] Keller, K.: Ionitrierung von Gußeisenwerkstoffen. *HTM* 25 (1970) 2, S. 106

Bildnachweis

AEK Interform, Gevelsberg;
 Allweiler, Radolfzell;
 Alzmetall, Altenmarkt;
 Babcock, Oberhausen;
 Bartz, Dillingen;
 Baumgarte, Bielefeld;
 Böhmfeld, Geseke;
 Brackelsberg, Ennepetal;
 Buchholz, Zweibrücken;
 Buderus, Wetzlar;
 Chemieanlagenbau, Staßfurt;
 Claas, Bielefeld;
 DaimlerChrysler, Mannheim;
 Deckel-Maho, Geretsried;
 Desch, Arnsberg;
 Dhonau, Triberg;
 Doering, Sinn;

Düker, Karlstadt;
 Eickhoff, Bochum;
 Eisengießerei Chemnitz, Chemnitz;
 Eisenguß Torgelow, Torgelow;
 Eisenwerke, Brühl;
 Flender, Wittgensdorf;
 Ford, Köln;
 Friedrichshütte, Laubach;
 Frischhut, Neumarkt-St. Veit;
 Geier, Velbert;
 Gienanth, Eisenberg;
 Gießerei- und Glasformenbau, Radeberg;
 GMB, Berlin;
 Gontermann-Peipers, Siegen;
 Gußwerk, Waltenhofen;
 Halberg Guss, Saarbrücken
 HegerGuss, Enkenbach;
 Heidenreich & Harbeck, Mölln;
 Heibling, Renchen;
 Herborner Pumpenfabrik, Herborn;
 Herold, Grefees;

Heunisch, Bad Windsheim;
 Hofmann, Bad Windsheim;
 Ischebeck, Ennepetal;
 Jürgensen, Sörup-Möllmark;
 Karcher, Offenburg-Windschlag;
 Kemptener Eisengießerei, Kempten;
 Keßler, Leipzig;
 Kleinken, Dorsten;
 Königshütte, Bad Lauterberg;
 Köster, Heide;
 Kurtz, Hasloch/Main;
 Leda, Leer;
 Lindner, Wülfrath;
 Lüneburger Eisenwerk, Lüneburg;
 Lütgert, Gütersloh;
 MWP, Stuttgart;
 Maho-Deckel, Geretsried;
 MaK, Kiel;
 MAN B & W, Augsburg;
 Mannesmann-Rexroth, Lohr;
 Martinlamitz, Schwarzenbach;

Meuselwitz Guss, Meuselwitz;
 Monforts, Mönchengladbach;
 Neue Harzer Werke, Blankenburg;
 Nortorfer Gußwerk, Nortorf;
 Olsberg, Hermann Everken, Olsberg;
 Opel, Rüsselsheim;
 P+S, Zweibrücken;
 Passavant, Aarbergen;
 Pleissner, Elze;
 Rebholz, Münster;
 Römheld & Moelle, Mainz;
 Schubert & Salzer, Erla;
 Schuler, Göppingen;
 Schwäbische Hüttenwerke, Aalen-Wasseralfingen;
 Siempelkamp, Krefeld;
 Sperber, Kronach-Neuses;
 Thyssen, Mülheim;
 Trompeter, Bindlach;
 Walzen Irlé, Netphen-Deuz;
 Weso-Aurorahütte, Gladenbach.



**Bundesverband
der Deutschen
Gießerei-Industrie (BDG)**

Hansaallee 203
40549 Düsseldorf
Internet: www.bdguss.de

Telefon: +49 (0)2 11/68 71-0
Telefax: +49 (0)2 11/68 71-3 33
E-mail: info@bdguss.de