

Gusseisen mit Kugelgrafit



Herstellung – Eigenschaften – Anwendung



Verwirklichen Sie Ihre
Konstruktionsideen
sie könnten entscheidend sein!



Konstruieren und Gießen

Informationen für den Gusskonstrukteur



Die Internetplattform des BDG **Konstruieren und Gießen** informiert Sie über Werkstoffe und Verfahrenstechniken der Gießereiindustrie. Sie hinterfragt neue Technologien und gibt Anregungen zur Gussgestaltung. Fakten und Kennwerte über Gusswerkstoffe und Gussteile geben dem Anwender weitere Hinweise für seine Arbeit. All dies finden Sie im Internet unter:

www.kug.bdguss.de

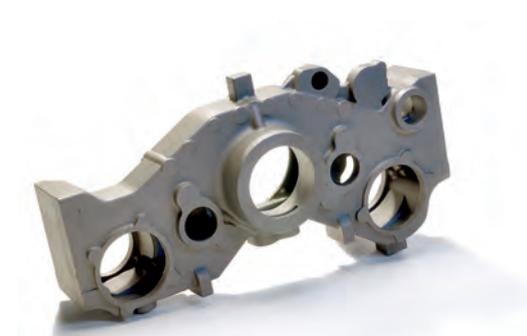
Inhalt

Gusseisen mit Kugelgraphit

Herstellung – Eigenschaften – Anwendung

Autoren:

*Dr. Ch. Bartels, DI R. Gerhards, Prof. H. Hanselka, Prof. K. Herfurth,
Dr. H. Kaufmann, DI W. Kleinkröger, Dr. M. Lampic, Dr. H. Löblich, Dr. W. Menk,
Prof. G. Pusch, Dr. T. Schmidt, DI K.-H. Schütt, DI P. Tölke, Prof. E. P. Warnke*



Titelbild: Räderkassette für Großdieselmotor aus EN-GJS-400-15

1	Einleitung	2
2	Konstruieren in Guss	7
3	Gießtechnik	15
	Sandformverfahren	16
	Dauerformverfahren (Kokillen, Schleuder- und Strangguss)	18
4	Metallurgie	22
5	Wärme- und Oberflächenbehandlung	27
6	Schweißen	38
7	Qualitätsmanagement, Qualitätssicherung und Qualität	49
8	Mechanische und physikalische Eigenschaften	53
	Eigenschaften bei Raumtemperatur	53
	Eigenschaften bei erhöhten Temperaturen	62
	Eigenschaften bei niedrigen Temperaturen	65
	Verschleißverhalten	68
	Korrosionsbeständigkeit	69
	Bruchmechanische Eigenschaften	71
	Betriebsfestigkeit	76
9	Spanende Bearbeitung	86
10	Werkstoffe mit besonderen Eigenschaften	92
	Austenitische Gusseisen mit Kugelgraphit	92
	Carbidische Gusseisen mit Kugelgraphit	94
	Gusseisen mit Vermiculargraphit (GJV)	94
	SiMo-Gusseisen	95
	Anhang: Normen und Richtlinien	97



Fräsmaschinengehäuse aus EN-GJS-400-18



Turbolader für Bootsmotor aus GJS-SiMo



Eine Magnesiumbehandlung der Basisschmelze führt zur Ausbildung des kugelförmigen Graphits.



Radträger aus GJS-SiboDur

1 Einleitung

Gusseisen mit Kugelgraphit wird erst seit fast 60 Jahren industriell gefertigt, zuerst in den USA, Kanada und Großbritannien. Das Gusseisen mit Kugelgraphit ist zufällig entdeckt worden. 1937/1938 berichtete C. Adey (RWTH Aachen) über die sphärolithische (kugelige) Form der Graphitkristalle im Gusseisen. Adey befasste sich bewusst mit der Suche nach einer zweckmäßigen Ausbildungsform des Graphits in Kolbenringen und meldete das Verfahren zum Patent an [1]: „Verfahren zur Herstellung von Grauguss höherer Festigkeit dadurch gekennzeichnet, dass ein eutektisches oder übereutektisches schlackeneinschlussfrei gemachtes Eisen mit einem Mindestgehalt von 1 % Silicium so rasch zum Erstarren gebracht wird, dass der Graphit ganz oder zum Teil in sphärolithischer Form in der metallischen Grundmasse ausgeschieden ist.“

H. Morrogh und W. J. Williams vom Britischen Gießereinstitut, BCIRA in Birmingham erzeugten Kugelgraphit im Gusseisen durch Cer-Zusatz zur Schmelze im Jahre 1947. Im gleichen Jahr wurden aus den USA auch Arbeiten und Patentanmeldungen von K. D. Millis, A. P. Gagnebin und N. Pilling bekannt, die die Herstellung von Gusseisen mit Kugelgraphit durch Magnesiumzusatz in Form von magnesiumhaltigem Nickel zur Schmelze zum Gegenstand hatten [2]. Ein Durchbruch gelang C. K. Donoho [3] bei ACIPCO (American Cast Iron Pipe Company), der 1949 durch Versuche mit Magnesium überraschend gute Erfolge erzielte.

Erst nach Ende des Zweiten Weltkrieges wurde das der INCO erteilte Patent veröffentlicht und dann auch weltweit von ihr lizenziert. Zuständig dafür war die MOND-Nickel-Ltd., London, eine englische Tochtergesellschaft der INCO. Das Vermitteln der Lizenzen an Gießereien in Deutschland und in einigen anderen Ländern erfolgte über die Metallgesellschaft AG (MG) in Frankfurt am Main.

Im **Bild 1** ist eine Graphitkugel mit dem typischen Sphärolithenkreuz abgebildet. Ausgehend von der Entdeckung der Graphitkugeln begann eine stürmische Entwicklung des Gusseisens mit Kugelgraphit, das mit seinen stahlähnlichen Eigenschaften zu vielen wirtschaftlich günstigen Substitutionen von Stahl führte.

1.1 Die Sorten

Gusseisen mit Kugelgraphit (GJS) ist nach **DIN EN 1563** (Normalsorten) und **DIN EN 1564** (hochfeste Sorten) ein Eisen-Kohlenstoff-Gusswerkstoff, dessen als Graphit vorliegender Kohlenstoffanteil nahezu vollständig in weitgehend kugelförmiger Form im Gefüge vorliegt (**Bild 2**). Das Kurzzeichen EN-GJS (alte Bezeichnung GGG) bedeutet: Gusswerkstoff (G) aus Eisen (Iron, J) mit Kugelgraphit (spheroidal graphite, S). Das oft vorgestellte EN weist auf die EU-Normbezeichnung hin.

Bei den Werkstoffsorten nach **DIN EN 1563** und **DIN EN 1564** handelt es sich um unlegiertes oder niedriglegiertes Gusseisen mit Kugelgraphit, wobei entsprechend der Festlegungen in den genannten Normen die chemische Zusammensetzung und die Wärmebehandlung im Ermessen des Herstellers liegt. Beim austenitischen Gusseisen mit Kugelgraphit nach **DIN EN 13825** handelt es sich um eine Gruppe von hochlegierten Gusseisensorten, bei denen neben den mechanischen Eigenschaften auch die chemische Zusammensetzung festgelegt ist.

In den gültigen Europäischen Normen (EN) lauten die Bezeichnungen für diese Gusseisenwerkstoffgruppe „Gusseisen mit Kugelgraphit“, „Spheroidal graphite cast iron“ und „Fonte a graphite spheroidal“. Eine Reihe weiterer Namen wie beispielsweise „Kugelgraphitguss“, „duktiles Gusseisen“, „sphärolithisches Gusseisen“, „Kugelgraphitgusseisen“ und „SPHÄROGUSS®“ bezeichnen keine Sonderarten, sondern die gleiche Werkstoffgruppe. In den USA wird Gusseisen mit Kugelgraphit „Ductile Cast Iron“, „Nodular

Cast Iron“ oder „SG (Spheroidal Graphite) Cast Iron“ genannt. Die Bezeichnung „Sphäroguss“ war ein gesetzlich geschützter Handelsname in der Zeit, als Deutschland noch für die Produktion von Gusseisen mit Kugelgraphit Lizenzgebühren bezahlen musste.

In der Norm **DIN EN 545** für die Produktgruppe Gussrohre, Formstücke und Zubehörteile zur Errichtung von Rohrleitungen sind die Bezeichnungen „Duktiles Gusseisen“ und „Duktile Rohre“ festgelegt. Es handelt sich dabei um mit dem Schlegelgießverfahren hergestellte Rohre aus einem ferritischen Gusseisen mit Kugelgraphit (**Bild 3**). Die Bezeichnung „Duktiles Gusseisen“ (**Bild 4**) wird in der Industriestatistik des Deutschen Gießereiverbandes (DGV) auch als Oberbegriff für Summe der Produktion von Gusseisen mit Kugelgraphit und Temperguss verwendet.

Seit einiger Zeit rückt eine Gusseisen-Werkstoffgruppe mit der weit verbreiteten Bezeichnung ADI immer stärker in den Vordergrund. Die Abkürzung ADI wurde aus dem Englischen übernommen und bedeutet „Austempered Ductile Iron“. Durch eine spezielle Wärmebehandlung entsteht bei diesen Sorten des Gusseisens mit Kugelgraphit ein Grundgefüge aus lattenförmigem Ferrit und Restaustenit. Die mechanischen Eigenschaften dieser Werkstoffe zeichnen sich durch sehr hohe Festigkeiten bei gleichzeitig hoher Plastizität und Zähigkeit aus (siehe Kapitel 8).

Während der Entwicklung dieser Werkstoffgruppe des hochfesten Gusseisens mit Kugelgraphit traten für sie mehrere verschiedene Bezeichnungen auf wie „Bainitisch-austenitisches Gusseisen mit Kugelgraphit“, „bainitisches Gusseisen mit Kugelgraphit“, „zwischenstufenvergütetes Gusseisen mit Kugelgraphit“ und „Austempered Ductile Iron (ADI)“. Da erst seit wenigen Jahren Klarheit über die Gefügebildung bei dieser Gruppe des Gusseisens mit Kugelgraphit besteht, scheint

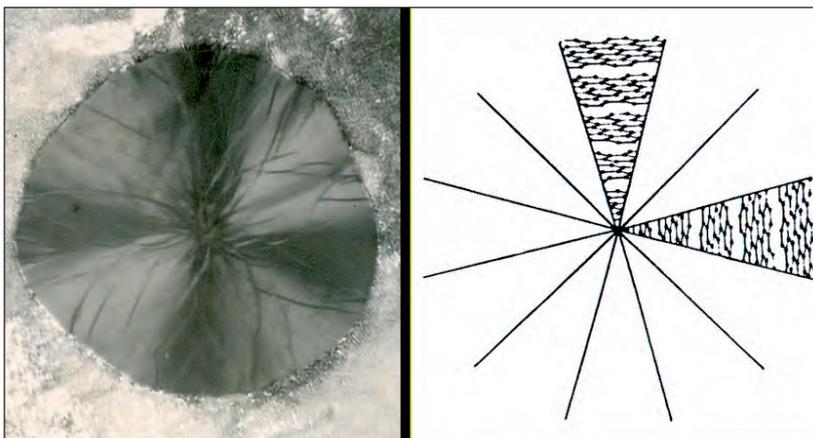


Bild 1: Graphitkugel mit Sphärolithenkreuz

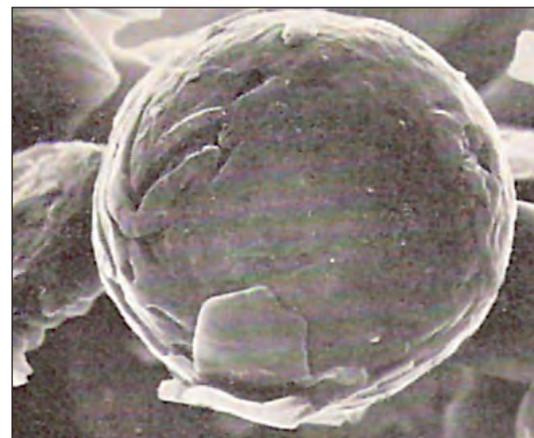


Bild 2: Räumliche Ausbildung von Kugelgraphit [11]



Bild 3: Schleudergussrohr im noch glühenden Zustand bei Herausziehen aus der Schleudergießmaschine (Bild: FACHGEMEINSCHAFT GUSS-ROHRSYSTEME, Berlin)

sich gegenwärtig folgende Bezeichnung durchzusetzen „Austenitisch-ferritisches Gusseisen mit Kugelgraphit“ („Ausferritic spheroidal graphite cast iron“, „Fonte austenitica a graphite spheroidal“) [2]. Trotz dieser unterschiedlichen Bezeichnungen handelt es sich immer um hochfestes Gusseisen mit Kugelgraphit mit den gleichen mechanischen und physikalischen Eigenschaften (**Bild 5**).

Charakteristisch für austenitisches Gusseisen mit Kugelgraphit ist sein auch bei Raumtemperatur und tiefen Temperaturen stabiles austenitisches Grundgefüge (**Bild 6**). Viele Sorten des austenitischen Gusseisens werden auch als „Ni-Resist“ bezeichnet. Diese Werkstoffe haben Nickelgehalte von 12 bis zu 36 % und zeichnen sich durch eine ganze Reihe außergewöhnlicher Eigenschaften aus (siehe Kapitel 10).

Zu den Entwicklungen der jüngeren Vergangenheit gehören auch die SiMo-Werkstoffe des Gusseisens mit Kugelgraphit für den Einsatz bei hohen Temperaturen (**Bild 6**). Ein erhöhter Zusatz von Silicium verstärkt die Zunderbeständigkeit und verringert die Schädigung des Werkstoffs durch innere Oxidation. Molybdän erhöht als Legierungselement die Warmfestigkeit (siehe Kapitel 10).

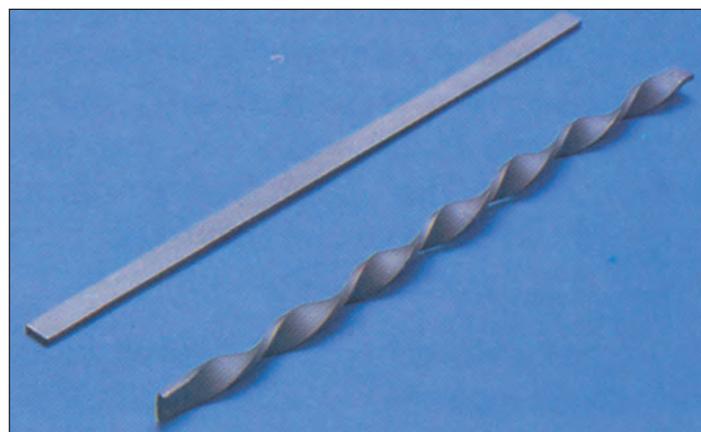


Bild 4: Die Duktilität von Gusseisen mit Kugelgraphit, im Bild anschaulich an einem kalt verdrehten Stab gezeigt

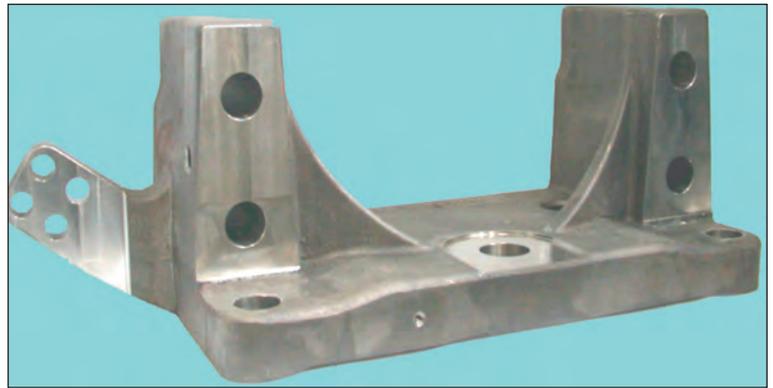


Bild 5: Bearbeitetes ADI-Gussteil Motorträger mit Lasche aus EN-GJS-800-2 (Bild: Hulvershorn, Bocholt)

Bei experimentellen Untersuchungen zur Herstellung von Gusseisen mit Kugelgraphit wurden Abweichungen von der Graphitkugelform beobachtet, die als wurmförmiger Graphit, Vermiculargraphit (Wurm – vermis, lat.) bezeichnet wurden. Später entstand daraus eine selbstständige Werkstoffgruppe – das Gusseisen mit Vermiculargraphit mit bis zu 10 % Kugelgraphit, jedoch ohne Lamellengraphit (siehe Kapitel 10).

Durch die Entdeckung der Graphitkugeln im Gusseisen und den nachfolgenden Forschungs- und Entwicklungsarbeiten umfasst die Familie des Gusseisens heute folgende Werkstoffgruppen:

- Gusseisen mit Lamellengraphit [5];
- Gusseisen mit Vermiculargraphit [6];
- Gusseisen mit Kugelgraphit (Normal-sorten);
- austenitisch-ferritisches Gusseisen (hochfestes Gusseisen), international als ADI bekannt [7];
- SiMo-Werkstoffe [8];
- Austenitisches Gusseisen, darunter auch austenitisches Gusseisen mit Kugelgraphit [9, 10];
- Verschleißbeständiges Gusseisen [11].

1.2 Die Geschichte

Bereits in den dreißiger Jahren des 20. Jahrhunderts wurden von verschiedenen Forschern die günstigen Eigenschaften eines Gusseisens mit möglichst kugelförmiger Graphitausbildung vorausgesagt. Weltweit gelang es 1937 erstmalig am Gießerei-Institut der RWTH Aachen, gezielt Gusseisen mit Graphitkugeln herzustellen. Beim Schmelzen in hochbasischen Schmelztiegeln unter hochbasischer Schlacke wurde auf der Suche nach einem hochwertigen Gusseisen mit Lamellengraphit solches mit Kugelgraphit entdeckt. Nahezu gleichzeitig wurde im British Cast Iron Research Institute die Wirksamkeit von Cer, das der Gusseisenschmelze zugesetzt wurde, für die Kugelgraphitbildung im Gusseisen gefunden.

Jedoch erst die Zufallsentdeckung in den Laboratorien der International Nickel Inc. in den USA, dass durch die Zugabe einer Ni-Mg-Legierung zur Gusseisenschmelze bei der Erstarrung Kugelgraphit entsteht, legte den Grundstein für die industrielle Produktion von Gussteilen aus Gusseisen mit Kugelgraphit. Es folgte die Pionierzeit der Werkstoffentwicklung mit Untersuchungen der Werkstoffeigenschaften, einer stetigen Verbesserung der Herstellungstechnologie und der Suche nach

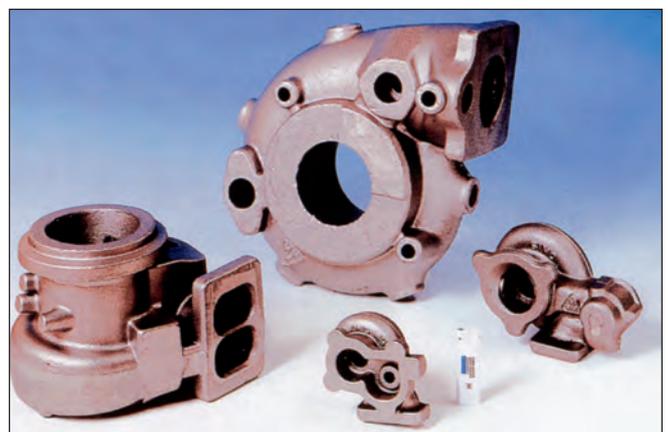


Bild 6: Diverse Turbinengehäuse für einen NKW-Abgasturbolader aus EN-GJSA-XNiSiCr35-5-2 und GJS-SiMO und EN-GJS-400-15 für einen PKW (Bild: Hasenclever, Battenberg)



Bild 7: Fräsmaschinengehäuse aus EN-GJS-400-18 mit gegen Schwingungen optimierter hochsteifer Rippenstruktur, Gewicht 12 t (Bild: SHW, Aalen-Wasserafingen)



Bild 8: Kurbelwelle aus EN-GJS-700-2 (Bild: Halberg Guss, Saarbrücken)

immer neuen Anwendungsgebieten unter Beteiligung vieler Forschungsinstitute, Gießereien und Gussanwender.

Mitte der fünfziger Jahre des 20. Jahrhunderts wurden in Deutschland die Fe-Si-Mg-Vorlegierungen für die Schmelzebehandlung entwickelt, die anstelle der vergleichsweise teuren Ni-Mg-Vorlegierungen eine wirtschaftlichere Behandlung der Gusseisenschmelze ermöglichten. In dieser Zeit begann auch die Entwicklung der duktilen Schleudergussrohre aus ferritischem Gusseisen mit Kugelgraphit, die nach umfangreichen Untersuchungen von den Technischen Überwachungsvereinen (TÜV) für den Gas- und Wasserleitungsbau freigegeben wurden. Unbemerkt von der Öffentlichkeit versorgen inzwischen viele Tausende von Kilometern duktiler Schleudergussrohre Haushalte und Betriebe in Städten und Gemeinden mit Gas und Wasser oder sorgen für die Abwasserableitung. Im Vergleich zu Rohren aus Gusseisen mit Lamellengraphit konnten mit den duktilen Rohren Gewichtseinsparungen bis zu 40 % realisiert werden.

Anfang der siebziger Jahre des 20. Jahrhunderts wurden der Maschinenbau (**Bild 7**) und der Fahrzeugbau Abnehmer von Gussteilen aus Gusseisen mit Kugelgraphit, wobei häufig Gusseisen mit Lamellengraphit (veraltete Bezeichnung „Grauguss“), Temporguss und Stahlguss durch Gusseisen mit Kugelgraphit substituiert wurde. Im Fahrzeugbau wurden beispielsweise die Kurbelwellen für PKW und Kleintransporter, die traditionell aus Schmiedestahl bestanden, sehr weitgehend auf Gusseisen mit Kugelgraphit umgestellt (**Bild 8**).

1967 lief das Hauptpatent für die Herstellung von Gusseisen mit Kugelgraphit ab, und der Lizenzgeber stellte die Benutzung auch der Folgepatente frei. Damit gehört die Bezeichnung „SPHÄROGUSS®“ der Vergangenheit an. Diese Bezeichnung war zur Zeit der Lizenznahme durch Deutschland der eingetragene patentgeschützte Handelsname, wird aber vielfach heute noch verwendet.

1.3 Der Unterschied – die Graphitformen

Der Begriff „Gusseisen“ war lange einerseits ein Synonym für Beständigkeit (ehern, eisern), andererseits aber mit der „Sprödigkeit“ des Werkstoffs verbunden. Spröde ist natürlich nur das Gusseisen mit Lamellengraphit. Diese Aussage trifft auf das Gusseisen mit Kugelgraphit nicht zu, was mit dem Begriff „Duktiles Gusseisen“ verdeutlicht werden soll.

Grauerstarrende Gusseisen-Werkstoffe sind genauer betrachtet Eisen-Kohlenstoff-Silicium-Werkstoffe, die aus einem metallischen Grundgefüge mit eingelagerten Graphitkristallen bestehen. Das Grundgefüge entspricht einem eutektoiden Stahl mit höherem Siliciumgehalt. Grauerstarrende Gusseisen-Werkstoffe haben also schon immer ein Grundgefüge

wie Stahl. Mit den Graphitlamellen wird dieses Grundgefüge stark unterbrochen, und an den Rändern dieser Graphitlamellen bilden sich bei Beanspruchung durch äußere Kräfte Spannungsspitzen aus (**Bild 9**). Die Graphitlamellen haben eine innere Kerbwirkung. Das sind die Ursachen für die relativ geringe Festigkeit und das spröde Verhalten von Gusseisen mit Lamellengraphit.

Seit einiger Zeit gibt es nun in den industriell genutzten Gusseisen-Werkstoffen drei verschiedene Graphitformen – Lamellengraphit, Vermiculargraphit und Kugelgraphit, die im **Bild 10** mit Schliffbildern – also bei zweidimensionaler Betrachtung – gezeigt sind. **Bild 11** vermittelt einen Eindruck über die räumliche Ausbildung der genannten Graphitkristalle.

Durch die Entwicklung des Gusseisens mit Kugelgraphit kommen die schon im-

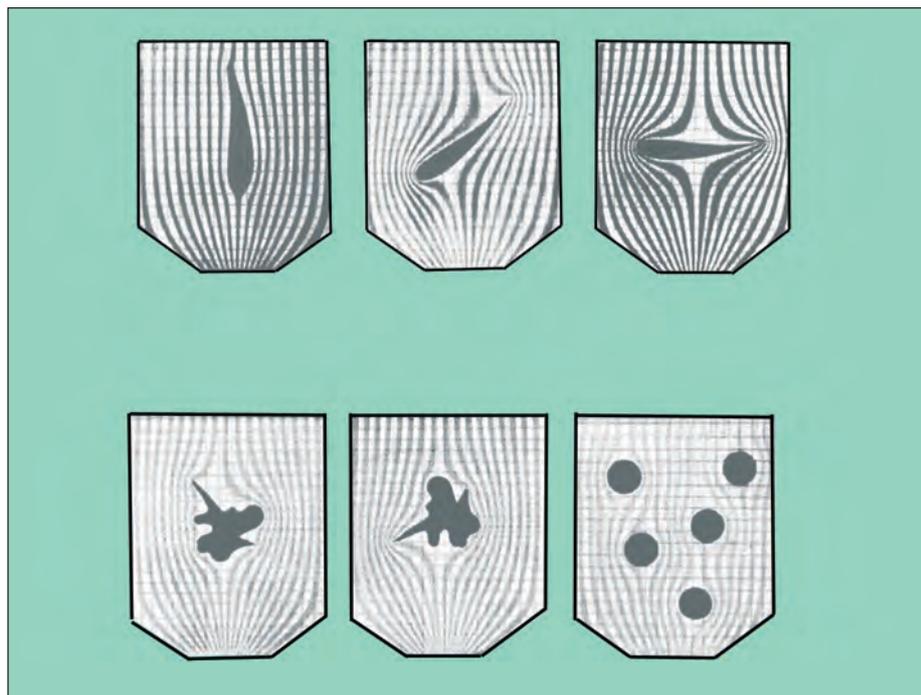


Bild 9: Die Kerbwirkung von Lamellengraphit (oben) und von Kugelgraphit (unten) [2]

mer vorhandenen stahlähnlichen mechanischen Eigenschaften wieder voll zum Tragen. Mit den Graphitkugeln wird die metallische Grundmasse viel weniger unterbrochen, und die innere Kerbwirkung gibt es nicht mehr. Die Festigkeitswerte springen nach oben, und das Gusseisen erreicht hohe Duktilität (**Bild 12**).

Vorschnell wäre jedoch die „logische Folgerung“, ganz ohne Graphit ginge es noch besser. Weit gefehlt! Die Graphitkristalle im Gusseisen haben einen günstigen Einfluss auf die Gießbarkeit, die Erstarrung, die Gefügedichtheit, die Zerspanbarkeit, das Notlaufverhalten und die Schwingungsdämpfungsfähigkeit, um nur einige Stichworte zu nennen. Für das Schmelzen von Gusseisen wird weniger Energie verbraucht als beim Schmelzen von Stahl.

1.4 Vorteile des Gusseisens mit Kugelgraphit

Seit mehr als 60 Jahren wird Gusseisen mit Kugelgraphit nun schon mit wirtschaftlichen Vorteilen anstelle von Stahl (Stahlguss, Schmiedestahl, Walzstahl) eingesetzt, und dieser Trend setzt sich weiter fort. Das Streckgrenzen/Zugfestigkeits-Verhältnis ist bei Gusseisen mit Kugelgraphit günstiger als bei den Stählen. Dieses Verhältnis liegt für die Stähle bei 0,44 bis 0,53, bei Gusseisen mit Kugelgraphit dagegen bei 0,6 bis 0,7.

Bei den Stählen ist bei vergleichbar hoher Festigkeit die Bruchdehnung höher als beim Gusseisen mit Kugelgraphit. Das ist jedoch, wie sich in vielen Fällen gezeigt hat, kein Nachteil. In diesem Zusammenhang sei auf ein Beispiel aus der Vergangenheit, auf die PKW-Kurbelwellen hingewiesen. In den sechziger Jahren begann die Umstellung dieser Kurbelwellen von Schmiedestahl auf Gusseisen mit Kugelgraphit. Bei gleicher Zugfestigkeit und gleicher Streckgrenze (Dehngrenze) von

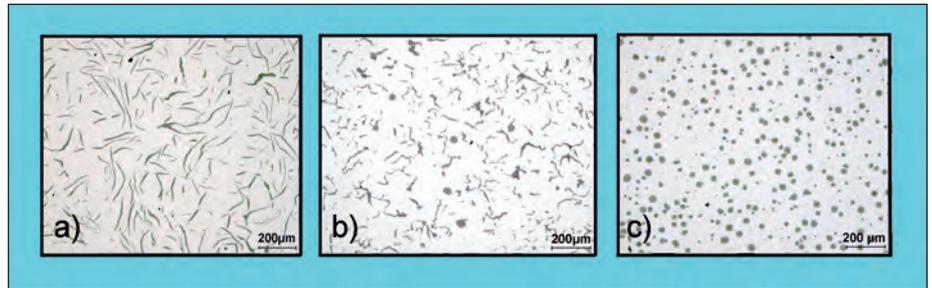


Bild 10: Schliffbilder von GJL, GJV, GJS

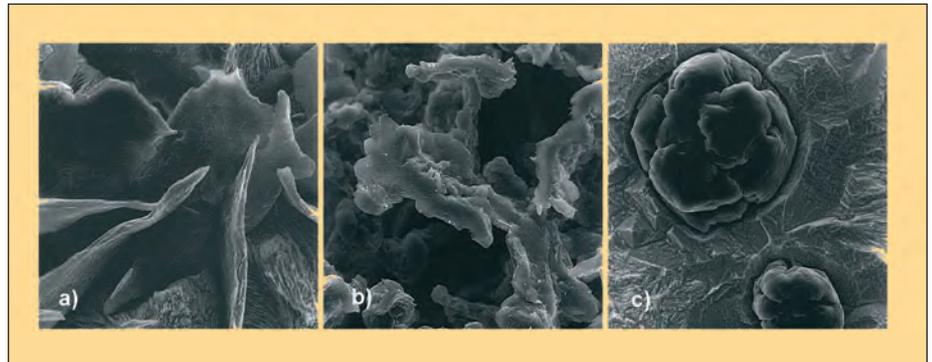


Bild 11: Die Raumformen der Graphitkristalle im Gusseisen
a - Lamellengraphit, b - Vermiculargraphit, c - Kugelgraphit

Schmiedestahl und von Gusseisen mit Kugelgraphit war die Bruchdehnung der verwendeten Gusseisensorte um eine Größenordnung kleiner als die der Stahlsorte (3 statt 20 %). Heute fahren über 90 % aller PKW und Kleintransporter mit Kurbelwellen aus Gusseisen mit Kugelgraphit, die völlig ausreichende Dauerfestigkeiten für Biegung und Torsion aufweisen.

Die Bruchdehnung beschreibt in erster Näherung das Umformverhalten (zum Beispiel die Schmiedbarkeit) eines Werkstoffs und ist deshalb eher eine Verarbeitung- als eine Gebrauchseigenschaft. Da Gussteile direkt nach dem Erstarren und Abkühlen endabmessungsnah ent-

stehen, ist kein Umformprozess notwendig. Ungefähr 90 % der Bruchschäden an Maschinenelementen sind Dauerbrüche infolge einer Werkstoffermüdung. Der Restbruch bei Dauerbrüchen ist immer ein Spröbruch, auch bei Stählen mit sehr hohen Bruchdehnungen.

Die Wiederverwendung (das Recycling) von Gusseisen mit Kugelgraphit ist wie bei Stahl fast vollständig. Abgesehen von Materialverlusten durch Verschleiß und Korrosion werden alle Schrotte (Kreislaufmaterial, Späne, ausgediente Bauteile) wieder eingeschmolzen. Dabei gibt es kein „Down-Cycling“, das heißt keinen Verlust an den guten Werkstoffeigenschaften. Es ist sogar ein „Up-Cycling“ jederzeit möglich, das heißt, aus Schrott mit einer geringen Festigkeit kann in der Gießerei auch ein Gusseisen mit Kugelgraphit höherer Festigkeit hergestellt werden.

1.5 Einfluss der metallischen Grundmasse

Die Art des metallischen Grundgefüges ist bei Gusseisen mit Kugelgraphit durch Wahl der chemischen Grundzusammensetzung, Legieren und/oder Wärmebehandlung in weiten Grenzen variierbar. Die Grundsorten mit einem ferritischen Grundgefüge haben die geringste Festigkeit und die höchste Plastizität und Zähigkeit und die mit einem perlitischen Grundgefüge die höchste Festigkeit und geringere Plastizität und Zähigkeit (**Bild 13**). Sorten mit einem Mischgrundgefüge (mit unterschiedlichen Ferrit-Perlit-Verhältnissen) liegen zwischen den genannten

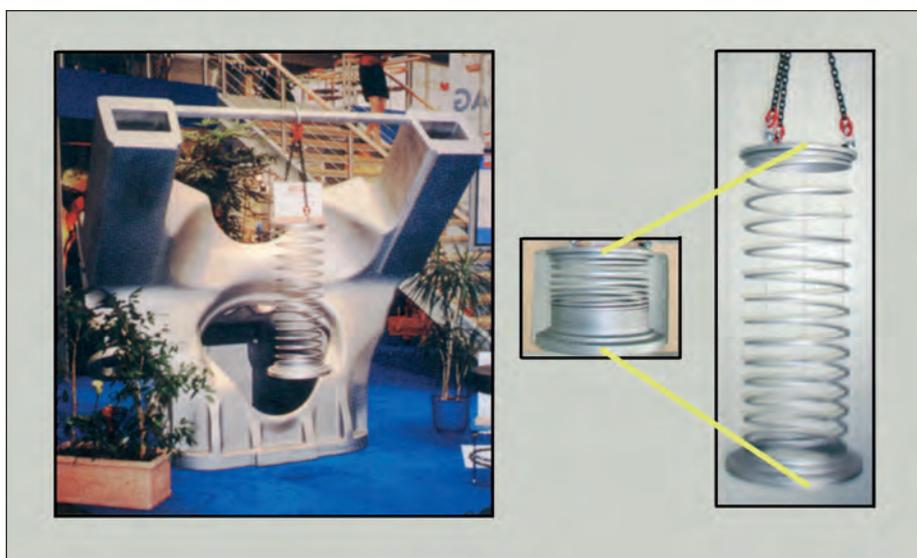


Bild 12: Windkraftgussteil aus duktilem Gusseisen mit Kugelgraphit (EN-GJS-400-18) mit einer mechanisch gefertigten Feder aus der gleichen Legierung

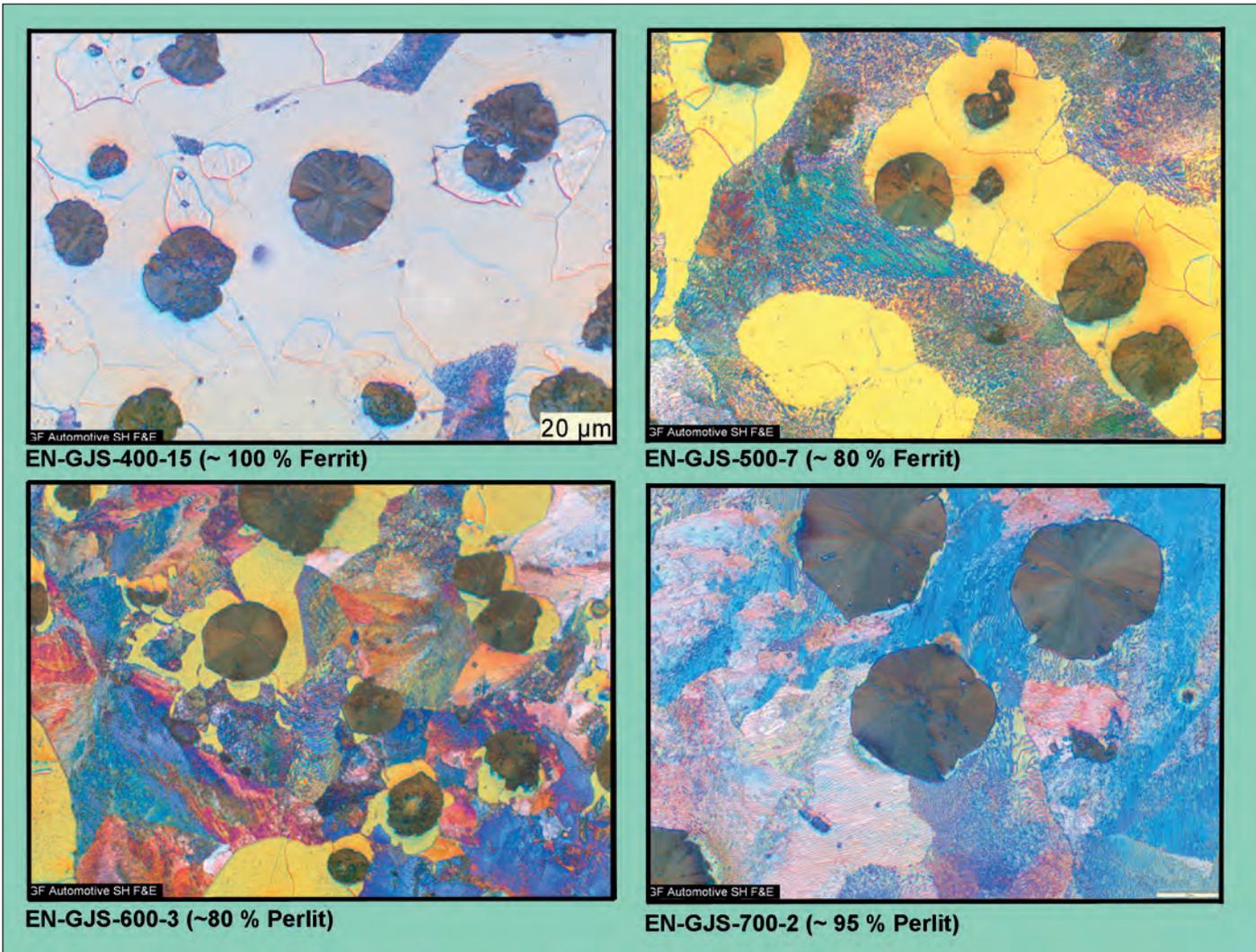


Bild 13: Verschiedene Grundgefügeausbildungen von Gusseisen mit Kugelgraphit

Grenzen. In Richtung sehr hoher Festigkeiten bei gleichzeitig günstiger Plastizität und Zähigkeit haben sie ein austenitisch-ferritisches Grundgefüge. So umfasst zum Beispiel die Zugfestigkeit der seit langem bekannten Normalsorten einen Bereich von 350 bis 900 N/mm² und der neu entwickelten hochfesten Sorten von 800 bis 1600 N/mm². Die mit Nickel hoch legierten Sorten des austenitischen Gusseisens mit Kugelgraphit haben ein bei hohen und niedrigen Temperaturen beständiges austenitisches Grundgefüge (siehe Kapitel 10).

Grundlegende Betrachtungen zur Gefügebildung bei der Erstarrung und Gefügewandlung durch Wärmebehandlung beim Gusseisen mit Kugelgraphit werden in [12, 13] angestellt.

Weltweit betrug die Produktion von Gussteilen aus Gusseisen mit Kugelgraphit 2005 19,6 Mio. Tonnen [14]. Die Produktion von Gussteilen auf Eisenbasis erreichte im Jahr 2006 in Deutschland folgende Werte [15]: Gussteile auf Eisenbasis gesamt 4,48 Mio. t (100 %) und davon aus

- Gusseisen mit Lamellengraphit 2,60 Mio. t (58,1 %),
- Gusseisen mit Kugelgraphit 1,60 Mio. t (35,7 %),
- Temperguss 0,06 Mio. t (1,3 %),
- Stahlguss 0,22 Mio. t (4,9 %).

Die Produktionsentwicklung von Gussteilen aus Gusseisen mit Kugelgraphit in Deutschland wird im **Bild 14** gezeigt. Die Gesamtproduktionsmenge seit den fünfziger Jahren, die Produktionsmengen für den Fahrzeugbau und den Maschinenbau seit den sechziger Jahren des 20. Jahrhunderts lassen bis in die Gegenwart eine ständige Zunahme erkennen. Anfangs bestand die Produktion aus einem sehr hohen Anteil von Schleudergussrohren. Dieser Marktanteil ist seit Mitte der siebziger Jahre etwa konstant geblieben. Für die Zukunft werden weltweit weiter steigende Produktionszahlen für Gussteile aus Gusseisen mit Kugelgraphit erwartet.

Die Herstellung von hochwertigen Gussteilen aus Gusseisen mit Kugelgraphit wird heute technisch sicher beherrscht. Die naturwissenschaftliche Ursache für die

Entstehung der Graphitkugeln und auch der anderen Graphitformen im Gusseisen ist trotz zahlreicher Untersuchungen und Deutungen noch immer nicht ganz geklärt. Die vielfältigen Faktoren, die auf die Erstarrung und damit auf Keimbildung und Kristallwachstum Einfluss haben, erschweren noch immer eine endgültige Formulierung einer umfassenden Theorie, und es gibt auf diesem Gebiet noch immer unterschiedliche Auffassungen. An dieser Stelle sei deshalb auf spezielle Fachliteratur verwiesen [16 bis 19].

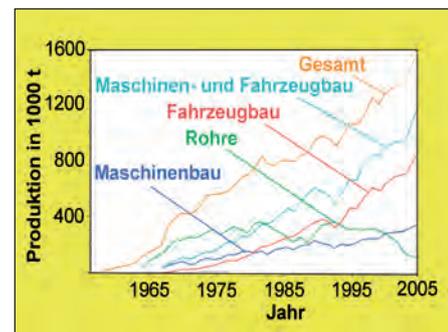


Bild 14: Produktionsentwicklung von Gussteilen aus Gusseisen mit Kugelgraphit in Deutschland (bis 1992 nur Westdeutschland) [15]

2 Konstruieren in Guss

Bei dem Entwurf von gegossenen Komponenten müssen im frühen Stadium des Designs Richtlinien zur Gestaltung beachtet werden, wobei bei optimaler Vorgehensweise bereits hier schon gießtechnische Belange einfließen sollten. Die Gießlage und die spätere Beanspruchung müssen aufeinander abgestimmt sein, damit nach dem rechnerischen Sicherheitsnachweis entsprechend den angewandten Richtlinien die sich ergebenden Belastungen auch vom örtlichen Gefügebau ertragen werden können.

Die zur Verfügung stehenden Normen und Richtlinien sind für verschiedene Kategorien von Anwendungen erarbeitet worden, so dass zur Gussteilbemessung generell ausreichende Unterlagen vorhanden sind und so die Vielfalt der Gestaltungsmöglichkeiten unterstützt wird.

2.1 Bemessen von Gussteilen

Die Anforderungen an gegossene Teile waren immer schon unterschiedlich hoch, doch gerade in heutiger Zeit werden von einem harten Wettbewerbsmarkt gegensätzliche Randbedingungen gefordert, die sehr schwer miteinander zu vereinbaren und einzuhalten sind. Zum einen sollen die Kosten niedrig sein und zum anderen muss die Konstruktion optimal bemessen sein, wie auch die Umweltbelange eingehalten werden müssen. Diese Herausforderungen gelten generell für alle hochwertigen Teile und in ihrer spezifischen Anwendung, und das für alle Gusswerkstoffe.

Während der Werkstoff Gusseisen mit Lamellengraphit (GJL, Grauguss) schon seit Jahrhunderten hergestellt wird, hat der Werkstoff Stahlguss seine Entwicklung vor über hundert Jahren begonnen und hat bis heute seine Einsatzgebiete weitgehend beibehalten, obwohl er heute im Wettbewerb zum Gusseisen mit Kugelgraphit steht. Ein vergleichsweise junger Werkstoff ist dagegen das Gusseisen mit Kugelgraphit (GJS) mit etwas mehr als 60 Jahren. Durch eine konsequente Weiterentwicklung wurde dieser Werkstoff aber erst in den letzten 35 Jahren in Europa auf den Stand gebracht, den wir heute haben. Und das bedeutet, dass auf Grund der werkstofftechnischen Erfolge die Steigerung der Gesamtmenge produzierter GJS-Gussteile gegenüber Stahlguss stetig ist und diese Entwicklung auch so in den nächsten Jahren anhalten wird.

Vor diesem Hintergrund ist es sehr wichtig, geeignete Kriterien und Vorschriften zum Bemessen von Gussteilen dem Konstrukteur zur Verfügung zu stellen.



Bild 15: Gussteil Pressenständer

a) in konventioneller Ausführung

b) nach einer Topologieoptimierung mit 19 % Gewichts- und 37 % Spannungsreduzierung

2.1.1 Bemessungsanforderungen

Beim Bemessen und Gestalten von gegossenen Komponenten muss die Funktionalität und das betriebssichere Verhalten gewährleistet sein, möglichst bei gleichzeitig minimalem Werkstoffvolumen. Die besten Beispiele liefert ja die Natur, bei der sich oft durch Evolution über Jahrtausende optimale Konfigurationen entwickelt haben. Doch lassen sich bei

der Gestaltung von Gussteilen nicht immer die Prinzipien der Bionik auf den Bauraum einer Konstruktion übertragen, da oft geometrische Zwänge den Freiraum zur Gestaltung einschränken. Bei dem im **Bild 15** dargestellten Gussteil ist der Schritt von der konventionellen Gestaltung zur optimierten Form sehr gut gelungen, zumal hier das Gewicht und die Höhe der Betriebsspannungen reduziert werden konnten [20].



Bild 16: Eine Fliesenpresse mit Gussständer aus EN-GJS-400-15, Gewicht etwa 40 t (Bild: Siempelkamp, Krefeld)

Die Basis für eine erfolgreiche Gussteilbemessung ist die genaue Kenntnis der Belastungsrandbedingungen. Diese können je nach Anwendung einfach oder komplex sein. Während die Betriebsfestigkeit zum Beispiel einer Fliesenpresse (**Bild 16**) dann nachgewiesen ist, wenn mit der maximal möglichen Presskraft unendlich viele Lastwechsel mit der maximalen Spannungsamplitude gefahren werden können, die im Dauerfestigkeitsschaubild zulässig ist, ist die Erfassung von Lastrandbedingungen zum Beispiel bei einer Windenergieanlagen-Komponente sehr viel komplexer. Dort müssen die relevanten Lastanteile aus einem turbulenten 3-D-Windfeld in Abhängigkeit von Zeitreihen beispielsweise für eine Nabe (**Bilder 17 und 18**) berechnet und ausgewertet werden. Die an den Blattwurzeln jeweils in drei Richtungen angreifenden Kräfte und Momente belasten die Nabe in variierenden Kraftkombinationen, deren resultierende Spannungen mit FEM-Analysen bestimmt werden. Die Bemessungsaufgabe besteht nun darin, aus den auftretenden möglichen Lastkombinationen diejenigen zu bestimmen, die für das Bauteil schädigungsrelevant sind und die in Wirklichkeit nicht auftreten dürfen.

2.1.2 Anforderungen an die Gießbarkeit

Eine weitere wichtige Voraussetzung für die Herstellung eines optimalen Gussteils ist das Abstimmen der Belange der Belastungssituation mit den Anforderungen der Gießtechnik. Denn Gießlage, Gießaufbau, Metallurgie, passive oder aktive Kühlung von Gussteilen beeinflussen die Gefügeausbildung. Mit diesen Parametern muss, auch mit Kompromissen, eine optimale Wahl getroffen werden, denn alle denkbaren Wunschoptionen können nicht gleichzeitig in einem Gussteil erfüllt werden. Dennoch erlaubt das Herstellungsverfahren Gießen eine an die Belastungen angepasste Gestaltung des Bauteils wie kein anderes Verfahren.

Für die Detailkonstruktion müssen Voraussetzungen der Gießbarkeit je nach Werkstoff beachtet werden. So bedarf es bei der Anordnung von Rippen, bei der Gestaltung von Stegen und Knotenpunkten der Beachtung von Empfehlungen, die aus der Praxiserfahrung stammen, wie für Gusseisen das VDG-Merkblatt K 200 [21].

2.1.3 Berechnungsanforderungen

Um die Herstellbarkeit eines Gussteils im Voraus zu erkennen, sollte eine Simulation der Formfüllung und des Erstarrungsverlaufes durchgeführt werden. In vielen Fällen ist eine Eigenspannungsberechnung erforderlich. Für die Bewältigung der vielfältigen Berechnungsaufgaben stehen inzwischen Soft- und Hardware-Systeme zur Verfügung, die eine optimale Auswertung ermöglichen, auf die ausführlich unter 2.2 eingegangen wird.

Zur Bewertung der Betriebsfestigkeit von Bauteilen sind Berechnungen erforderlich, wobei die Berechnungsergebnisse mit den Vorgaben aus Normen und Regelwerken verglichen und bewertet werden. Dazu müssen für den jeweiligen Werkstoff alle Materialdaten vorliegen. Diese sind neben den üblichen Kennwerten, wie Dehngrenze, Bruchdehnung, Festigkeit, Dauerschwingfestigkeit je nach Anforderungen auch Warmfestigkeit, Zeitfestigkeit, S/N-Kurve, statische oder dynamische Bruchzähigkeit und Dämpfung.

An den Realgussteilen selbst muss dann im Rahmen der Qualitätssicherung überprüft werden, ob die angenommenen Werte auch in den Gussteilen realisiert werden. Dies erfolgt durch die Prüfung von Proben, die angegossen sind oder durch Prüfung von Hohlbohrproben, die dann das Materialverhalten im Gussteil „vor Ort“ widerspiegeln.



Bild 17: Auftretende Kräftelemente an einer Nabe für Windenergieanlagen

2.1.4 Richtlinien und Regelwerke

Während im Bauwesen und im Druckbehälterbau schon sehr lange Richtlinien bestehen, deren Erfüllung von Behörden, Prüfgesellschaften oder vom TÜV geprüft werden, hat es für den allgemeinen Maschinenbau lange gedauert, bis Bemessungs-Richtlinien erarbeitet wurden.

Welche Richtlinie, Norm oder welches Regelwerk anzuwenden ist, hängt vom Besteller eines Gussteils ab. Wenn bei der Bestellung keine Forderungen gestellt werden, ist der Lieferant (oder Gießer) verpflichtet, nach dem neuesten Stand von Wissenschaft und Technik zu liefern. Dies bedeutet, dass der verantwortliche Konstrukteur oder Ingenieur für das Bauteil ein geeignetes Regelwerk anwendet.

Werden vom Besteller Nachweise gefordert, so hängt es davon ab, ob der Besteller innerhalb der Europäischen Union Nachweise nach Europäischen Regelwerken fordert oder ob ein weltweit gültiges Regelwerk zur Anwendung kommen soll. Dazu müssen dann auch akkreditierte Prüflabors eingeschaltet werden, was immer einen zusätzlichen Aufwand an Zeit und Kosten bedeutet.

Für die Bemessung von Druckbehältern gibt es mehrere Regelwerke (national, europäisch, weltweit). Für Off-Shore Anwendungen (hauptsächlich Ölplattformen) gelten spezielle Regelwerke, genauso wie auch für den Schiffsbau und für Windenergieanlagen. Die Standard-Gusswerkstoffe sind dagegen alle weltweit genormt. Sonder-Gusswerkstoffe werden von einzelnen Gießereien in Werksnormen geführt. Die wichtigsten Regelwerke für Gussteile aus Gusseisen mit Kugelgraphit sind:



Bild 18: Rotornabe für Windenergieanlage aus EN-GJS-400-18-LT; Gewicht 2 1000 kg (Bild: Silbitz Guss GmbH)

1. ASME Boiler and Pressure Vessel Code

Der ASME-Code entstand in den USA als Druckbehältervorschrift der **American Society of Mechanical Engineers**. Er wird ständig durch das „Boiler and Pressure Vessel Committee“ auf dem neuesten Stand gehalten [22]. Der Code ist in seinen Vorschriften konservativ, jedoch weltweit als Standard-Regelwerk anerkannt. Als Gusswerkstoffe sind Stahlguss, Gusseisen mit Lamellen- und Kugelgraphit für den Einsatz als Druck führende Elemente wie Pumpengehäuse, Fittings und Rohre (Bild 19) zugelassen und in der Section II „Materials, Part A“ spezifiziert. Diese Spezifikationen entsprechen den ASTM Standards (US-Werkstoffnormen).



Bild 19: Verlegen eines 8 m langen Druckrohr-Abschnittes aus duktilem GJS in einem Braunkohletagebau (Bild: ZGV)

Das Auslegen der Gussteile erfolgt nach Section VIII „Pressure Vessels, Division 1 und 2“. Dort werden auch die Sicherheitsbeiwerte vorgegeben. In einem neueren Abschnitt „Division 3“ werden Regeln für die Auslegung von gewickelten Höchstdruckbehältern beschrieben. Als einzusetzende Werkstoffe sind jedoch Gusswerkstoffe hier ausgeschlossen. Im **Bild 20** ist eine wickelvorgespannte Gusskonstruktion dargestellt, die nicht nach ASME ausgelegt wurde und trotzdem erfolgreich im Einsatz ist.

Der ASME-Code wird oft zum Bewerten der Zulässigkeit von berechneten Spannungen herangezogen, wie es zum Beispiel in der Section III „Division 1, Subsection NB“ für zähe Werkstoffe beschrieben wird. In Anlehnung hierzu wird auch oft eine einaxiale Spannungsbeurteilung für Gusswerkstoffe als Verfahren zum Ermitteln der maximalen Spannungsamplituden aus einer mehraxialen Belastung durchgeführt. Zum Bewerten von Rissen und Ungängen kann die Section XI „Appendix A“ herangezogen werden, um Spannungsintensitätsfaktoren K_I zu bestimmen, die dann mit Materialkennwerten verglichen und bewertet werden können.

Bruchmechanische Überlegungen müssen bei der Bemessung von Gussteilen dann mit berücksichtigt werden, wenn es sich bei dem Gussteil um eine sicherheitsrelevante Komponente handelt, bei der nicht entdeckte Ungängen angenommen werden, die statistisch gesehen immer wieder bei einer Prüfung übersehen werden könnten und die bei entsprechender Belastung zu einem Versagen führen könnten.

II. Europäische Druckgeräterichtlinie

Diese Richtlinie gilt für Konstruktion, Herstellung und Konformitätsbewertung (Er-

füllung der Anforderungen) von Druckgeräten mit einem zulässigen Überdruck von mehr als 0,5 bar [23]. In der Formulierung wird ausgedrückt, dass als Werkstoffe nur solche eingesetzt werden dürfen, die „... angemessene Eigenschaften für alle Betriebsbedingungen ...“ haben und „... ausreichend duktil und zäh ...“ sind, wobei Gusseisen mit Lamellengraphit nicht grundsätzlich ausgeschlossen wird, Gusseisen mit Kugelgraphit aber voll eingeschlossen ist [24]. So gilt nach einer Harmonisierung der Druckgeräte-Richtlinie mit den Gusseisen-Werkstoffnormen im Jahre 2000, dass alle DIN-EN-Gussnormen angewandt werden können.

Die Normen werden durch einen Hinweis im Vorwort und durch einen Anhang ZA an die Richtlinie allgemein angepasst. Die Eignung eines gewählten Werkstoffs kann im Einzelfall zum Beispiel durch Hinzuziehen der AD-Merkblätter überprüft werden.

Die Berechnungsvorschriften zu Druckgeräten werden in einer Normenreihe **EN 13445** festgelegt.

Als Beispiel für eine drucktragende Komponente ist ein Dampfturbinenteil im **Bild 21** dargestellt.

III. AD-Merkblätter

Die AD-Merkblätter wurden von der „Arbeitsgemeinschaft Druckbehälter (AD)“ erstellt [25] und behandeln den Gültigkeitsbereich, alle Werkstoffsorten, Prüfungen, Kennzeichnung, Nachweis der Güteeigenschaften und Kennwerte für die Bemessung von Druckbehältern. Im Jahr 2000 hat der VdTÜV die AD-Merkblätter überarbeitet und als Merkblattreihe **AD2000** neu herausgegeben. In der Reihe W sind für Gusseisen und Stahl Richtlinien zum

Bau von Druckbehältern aufgeführt. Im Einzelnen sind dies:

- W 3/1: Gusseisen mit Lamellengraphit, unlegiert und niedriglegiert;
- W 3/2: Gusseisen mit Kugelgraphit, unlegiert und niedriglegiert;
- W 3/3: Austenitisches Gusseisen mit Lamellengraphit;
- W 5: Stahlguss;
- W 10: Werkstoffe für tiefe Temperaturen – Eisenwerkstoffe.

Diese Vorschriften gelten nur für Druckbehälter und können nicht allgemein auf den Maschinenbau angewendet werden.

IV. FKM-Richtlinien

Die FKM-Richtlinien „Rechnerische“ und „Bruchmechanische“ Festigkeitsnachweise für Maschinenbauteile [26, 27] wurden durch das Forschungskuratorium Maschinenbau e.V. (FKM) in langjähriger Arbeit neu erstellt und gelten für alle metallischen Werkstoffe im allgemeinen Maschinenbau. Die Richtlinie „Rechnerischer Festigkeitsnachweis“ basiert auf den ehemaligen TGL-Standards, die im Institut für Leichtbau, Dresden, in den Jahren 1979 bis 1988 erarbeitet wurden [28].

Während die unter I, II und III genannten Regelwerke sich hauptsächlich auf Druck tragende Komponenten beziehen, gilt die FKM-Richtlinie ganz allgemein für Maschinenbauteile und deckt somit umfassend einen großen Bereich ab. Sie ermöglicht den statischen, den Dauer- und Betriebsfestigkeitsnachweis für Bauteile des Maschinenbaus unter Beachtung aller wesentlichen Einflussgrößen [29]. Als Ergebnis der Auslegung nach dieser Richtlinie ist im **Bild 22** ein Maschinenträger dargestellt.



Bild 20: Wickelvorgespannte Konstruktionen sind auch bei Gussteilen aus GJS anwendbar, wie bei diesem Pressenkörper aus GJS-400-18, der für eine Haltekraft von 200 000 kN vorgespannt wurde (Bild: Siempelkamp, Krefeld)



Bild 21: Dampfturbinen-Innengehäuse-Unterteil aus EN-GJS-400-15 für die Niederdruckstufe, Gewicht 43 t (Bild: ZGV, Düsseldorf)

Die „Bruchmechanik“-Richtlinie befasst sich mit dem Verhalten von Rissen und Werkstoffungängen bei statischer und zyklischer Belastung und bezieht alle gängigen Werkstoffe mit ein. Somit sind die FKM-Richtlinien umfassende Regelwerke, die in Deutschland und anderen europäischen Ländern angewendet werden.

Für beide Teile der Richtlinien existieren Software-Programme, die den rechnerischen Nachweis erheblich erleichtern und vereinfachen.

V. Richtlinie für EN-GJS-400

Am Fraunhofer Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit in Darmstadt wurde in den Jahren 1993 bis 1997 ein Prüfprogramm zu Ermittlung der Schwingfestigkeit von GGG-40 (EN-GJS-400-15) in Dickwandguss mit und ohne Gefügeungängen durchgeführt, an denen sieben Gießereien beteiligt waren [30, 31].

Während die FKM-Richtlinie ganz allgemein für alle metallischen Werkstoffe gilt, ist hier eine Bemessungsbasis geschaffen worden, die dem spezifischen Verhalten des Gefüges von GJS Rechnung trägt. Durch die Auswertesystematik gelang es, Kennwerte abzuleiten, die unabhängig von Geometrie, Belastungsart und Gradienten, einem bestimmten höchstbelasteten Werkstoffvolumen zugeordnet werden können. Die ertragbaren Spannungsamplituden lassen sich auf andere Werkstoffvolumina, Schwingzahlen und Spannungsverhältnisse übertragen. Diese Zusammenhänge gelten sowohl für ungestörte Gefüge wie auch für etwaige Gefügeungängen, wie Poren, Dross oder entartete „Graphitkugeln“. So ist es möglich, bei einer nach Fertigstellung eines Gussteils entdeckten Ungänge eine Bewertung der Zulässigkeit von Spannungsamplituden an dieser Stelle vorzunehmen, wodurch die Verwendung der Komponente abgesichert werden kann. Durch diese Untersuchungen ist es möglich, den Werkstoff EN-GJS-400 noch besser in seinen charakteristischen Eigenschaften auszunutzen. Dies gilt sowohl bei der Bemessung von Gussteilen als auch bei der Beurteilung von fertigen Bauteilen.

Im **Bild 16** ist eine Fliesenpressen-Konstruktion zu sehen, die nach diesem Dickwandguss-Kriterium ausgelegt wurde.

Der Vorzug der Bemessungsmethode für EN-GJS-400 -15 nach Fraunhofer LBF ist der, dass auch nach dem Fertigstellen eines Gussteils eine Bewertung der Zulässigkeit der Spannungsamplituden an Hand von Schliffbeurteilungen erfolgen kann und so ein großer wirtschaftlicher Vorteil bei sicherem Betriebsverhalten einer Gusskomponente mit Ungängen erzielt werden kann.



Bild 22: Maschinenträger aus EN-GJS-400-18-LT; Gewicht 2,9 t (Bild: ZGV, Düsseldorf)

Andere Richtlinien sind für die Bemessung von GJS auch anwendbar, doch bleiben die gutmütigen spezifischen Eigenschaften dieses Werkstoffs unberücksichtigt, was zu einer Überdimensionierung führen kann.

VI. Richtlinie für Windenergieanlagen

Zum Bemessen von Gussteilen in Windenergieanlagen wie zum Beispiel Naben, Wellen, Grundrahmen wurde von der Germanischen Lloyd WindEnergie GmbH eine Richtlinie [32] erarbeitet, nach der komplette Windenergieanlagen in Deutschland zugelassen werden. Die Werkstoffe EN-GJS-400-18U-LT und EN-GJS-350-U-LT sind dort spezifiziert. Verknüpft mit der Richtlinie ist ein Leitfaden für die Betriebsfestigkeitsberechnung [33], der die Verwendung von synthetischen Wöhlerlinien erlaubt. Zur Absicherung der S/N-Kurven werden dem Bauteil entnommene Proben auf ihr zyklisches Verhalten untersucht und in Wöhlerlinien dargestellt. Neuere Untersuchungen zeigen, dass es sinnvoll ist, dehnungsgeregelte Schwingversuche durchzuführen, um den Übergang vom elastischen zum plastischen Anteil der Dehnungsamplitude zu bestimmen. Diese Phänomene werden bei einer neuen Überarbeitung der Richtlinien berücksichtigt werden.

Neu bei der Beurteilung von Komponenten ist die Möglichkeit, mit bruchmechanischen Gesichtspunkten die Betriebsdauer zu bewerten.

Vor dem Hintergrund der Gestaltungsfreiheit in der Anwendung von Gussteilen wird der Bedarf an Bemessungshilfen für Gussteile weltweit ansteigen. Für das Bemessen von Gussteilen stehen heute bereits verschiedene Regeln, Vorschriften und Leitlinien zur Verfügung, die es erlauben, Gussteile entsprechend ihrer Verwendung betriebssicher zu bemessen. Weitere Schritte zur Optimierung von Gussteilen sind die Gestaltung mit Hilfe „Bionik-Software“ und weiterer rechnergestützter Konstruktionshilfen, die es ermöglichen, schneller und genauer Gussteile zu bemessen.

2.2 Einsatz der C-Techniken zur Gussteilentwicklung

In den vergangenen Jahren haben sich die Randbedingungen für die Entwicklung und Produktion vieler Erzeugnisse, in denen Gussteile eingesetzt werden, 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 wiederholten wirtschaftlichen Einbrüche im Automobil- und Maschinenbau bewirkten einen starken Personalabbau insbesondere in den Entwicklungsabteilungen (Stichwort „Outsourcing“). Mit den schlankeren Strukturen können häufig nicht alle bei einer Neuentwicklung anfallenden Aufgaben mit eigenen Ressourcen bewältigt werden
- In Vorlesungen muss die gesamte Bandbreite der Fertigungstechnik abgehandelt werden. Das Fertigungsverfahren „Gießen“ wird nicht immer ausreichend vertieft und kann mangels erforderlicher Infrastruktur auch in den meisten Praktika nicht berücksichtigt werden. Daher fehlt den Nachwuchs-Ingenieuren oftmals entscheidendes Wissen über die Möglichkeiten zur Konstruktion wirtschaftlich und funktional überzeugender Bauteile.

Hinzu kommt, dass auch die Firmen die Ausbildung von Nachwuchskräften vernachlässigt haben. Daher ist bei einer erhöhten Nachfrage der Bedarf nicht leicht wieder abzudecken. 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 hierbei modernste Software- Werkzeuge zum Einsatz kommen.

Der Zulieferer muss als Entwicklungspartner angesehen werden. Eine Zusammenarbeit beginnt zweckmäßigerweise nicht erst dann, wenn die Produkte fertig konstruiert sind, denn der in der Entwicklungsphase festgelegte Kostenanteil liegt bei 70 bis 80 %. Die Beratung oder weitergehende Unterstützung durch den Zulieferer in dieser Phase kann erhebliches Einsparpotential erschließen.

2.2.1 CAD-gestütztes Konstruieren

Mittlerweile hat sich die 3D-Konstruktion von Bauteilen auf breiter Front durchgesetzt (**Bild 23**). Gegenüber dem 2D-CAD ergibt sich insbesondere bei der Gussteil-Konstruktion ein höherer Nutzen durch

- Visualisieren des Bauteils, beispielsweise zur Prüfung auf kostensparende Fertigungsverfahren,
- Darstellung der Baugruppe bei der Prüfung auf Integrierbarkeit von Anbauteilen,
- Festlegen der Arbeitsfolge beim Aufbauen der Form (Kerne, Formteile) in der Gießerei,
- Ermitteln von Volumina und Gewicht von Gussstück, Kernen und Form,
- Einsatz entwicklungsbegleitender Rohguss-Kalkulation,
- Beurteilung von Montage- und Fertigungsfragen zur Minimierung von Produktionsrisiken.

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.

Ob gusspezifische Features wie Verrundungen und Ausformschrägen bei der CAD-Modellierung berücksichtigt werden, hängt stark von der Art der späteren Modellherstellung ab. Während bei komplexen Großgussteilen der Modellbau noch stark handwerklich geprägt ist und somit erheblicher Konstruktionsaufwand durch Verzicht auf diese Features eingespart werden kann, setzt sich das CNC-Fräsen der Modelleinrichtung nach CAD-Datensätzen bei kleineren Gussteilen zunehmend durch. Vor der Modellierung der fertigungsspezifischen Features durch den Gussabnehmer ist die Abstimmung des Formaufbaus mit der Gießerei dringend zu empfehlen.

Die auf der Bauteilgeometrie basierenden Nachfolgeprozesse (zum Beispiel Berechnung, gießtechnische Simulation und NC-Programmierung) verwenden weitestgehend das gleiche CAD-Modell und können daher im Sinne des Simultaneous Engineering parallel abgearbeitet werden.

2.2.2 Topologie-Optimierung

Die weiter unten beschriebene Finite-Elemente-Methode (FEM) erlaubt das sichere Auffinden konstruktiver Schwachstellen in einem CAD-Entwurf sowie eine objektive Beurteilung von Konstruktions-

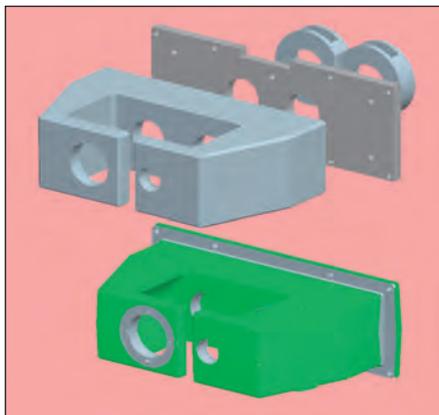


Bild 23: Explosionsdarstellung einer gefrästen Halterung und Gussteil (48 kg, EN-GJS-400-15) nach Umstellung des Fertigungsverfahrens bei etwa 20 % Gewichtsreduzierung und signifikanter Kostensenkung durch Integralbauweise

varianten. Mit diesem Hilfsmittel kann sich der Entwickler durch wiederholte Modifikationen im CAD-Modell iterativ an eine funktional überlegene Lösung herantasten. Insbesondere bei großen, komplexen Bauteilen mit entsprechenden konstruktiven Freiheitsgraden ist diese Vorgehensweise zeitaufwändig. Mit der Topologie-Optimierung steht ein Werkzeug zur Verfügung, das hinsichtlich des zunehmenden Termindrucks bei der Bauteilentwicklung Entlastung schafft.

Ausgehend von dem für das zu entwickelnde Bauteil maximal verfügbaren Bau- raum liefert es unter Berücksichtigung aller relevanten Lastfälle kraftflussgerechte Gestaltungsvorschläge (**Bild 24**). Dabei können im Lösungsvorschlag zu enthaltende Bauteilbereiche vorgegeben sowie Fertigungsrestriktionen wie Ausformrich-

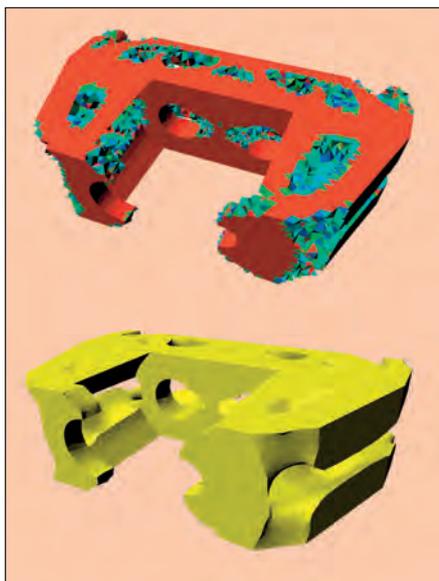


Bild 24: Topologisch optimierter Gestaltungsvorschlag für Halterung

oben: massereduziertes FEM-Modell, unten: für den CAD-Import geglättetes Volumen

tungen berücksichtigt werden. Inspiriert von diesen Vorschlägen ist eine treffsichere Bauteilkonstruktion ohne zeitfressende Iterationsschleifen möglich. Aufgrund der Formgebungsfreiheit ist das Fertigungsverfahren Gießen für die Umsetzung der topologisch optimierten Gestaltungsvorschläge in sowohl funktions-optimierte als auch wirtschaftlich herstellbare Komponenten geradezu prädestiniert.

2.2.3 FEM-Berechnung

Das Schaffen eines funktionsgerechten Bauteils sollte im Vordergrund der Gussteilentwicklung stehen. 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 einem unnötigem Werkstoffaufwand und damit steigenden 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 bereits bei einfachen Bauteilgeometrien schwierig oder gar unmöglich. Daher hat sich nicht nur für komplexere Bauteile mit der Finite-Elemente-Methode (FEM) ein mächtiges Werkzeug zum Nachweis der funktionalen Anforderungen (zum Beispiel last- oder temperaturbedingte Verformung, Festigkeit, Schwingungsverhalten) durchgesetzt (**Bild 25**). 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 können auf diese Weise Bauteile unter Beachtung der Verformungs-, Gewichts- oder Kostenrestriktionen optimiert werden.

Der Nutzen des FEM-Einsatzes ist enorm, da konstruktive Schwachstellen sicher aufgedeckt und durch deren Beseitigung oft erhebliche Steifigkeitsgewinne realisiert werden können. Die großen konstruktiven Freiheiten beim Fertigungsverfahren Gießen erlauben es, dass die Kontur des Bauteils exakt an die Anforderungen angepasst werden kann. Es empfiehlt sich, für die per FEM-Analyse ermittelten hoch belasteten Bauteilbereiche gezielte Prüfanweisungen zu verfassen und so den Prüfaufwand beim Zulieferer auf das technisch Notwendige zu beschränken.

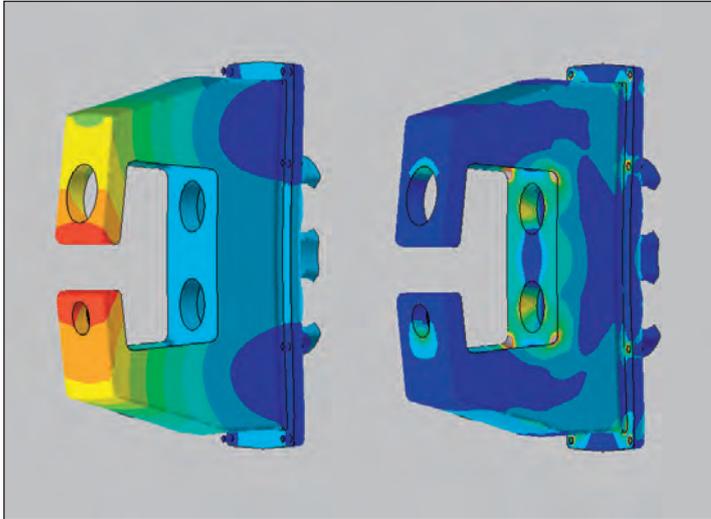


Bild 25: Beispiele zur Bestimmung der Verformungen (links) und Spannungsverteilung (rechts) mit Hilfe der FEM-Methode

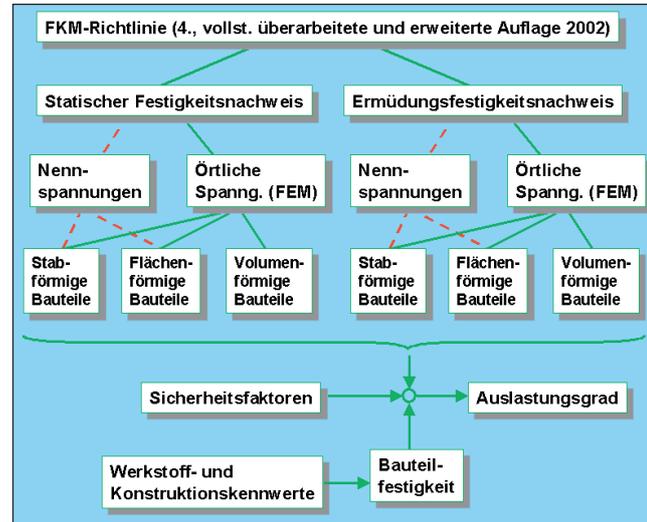


Bild 26: Übersicht über die in der FKM-Richtlinie für den Maschinenbau geregelten Festigkeitsnachweise

2.2.4 Form-Optimierung

Weist ein Gussteil Übergänge mit engen Eckenradien auf, können bei entsprechender Belastung hohe Kerbspannungen induziert werden, welche die Belastbarkeit erheblich senken. Wenn nur wenig Änderungsmöglichkeiten bezüglich Gewicht und/oder Geometrie an einem weitgehend auskonstruierten Bauteil bestehen, kann die Formoptimierung zum Erreichen der benötigten Festigkeit beitragen. Sie wertet jeweils nach einer FEM-Analyse die Spannungen an der Bauteiloberfläche aus und verschiebt iterativ solche Knoten, deren Spannungswerte oberhalb eines vorgegebenen Schwellwertes liegen, nach außen. Ähnlich den natürlichen Wachstumsvorgängen entstehen dadurch harmonische, kerbwirkungsarme Übergänge mit nahezu konstanten Oberflächenspannungen.

Wegen der relativ hohen Aufwände für das Erstellen der für die Optimierung geeigneten FEM-Modelle und die Rückführung des Optimierungsergebnisses in die CAD-Umgebung bleibt die Anwendung dieses auch als CAO (Computer Aided Optimization) bezeichneten Verfahrens noch auf Großserienteile beschränkt.

2.2.5 Festigkeitsnachweis

Für höher belastete Bauteile ist es Stand der Technik, die Festigkeit in Prüfstandsversuchen oder rechnerisch nachzuweisen. Aufgrund der im Allgemeinen komplexen Geometrie lassen sich die für ebene und zylindrische Körper entwickelten Nennspannungskonzepte nicht auf Gussteile anwenden. Stattdessen ist der rechnerische Festigkeitsnachweis für volumenförmige Bauteile auf Basis örtlicher Spannungen zu führen.

Die Vorgehensweise ist in der FKM-Richtlinie „Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile“ beschrieben (**Bild 26**) [26]. Für die höchstbelasteten Knoten werden die per FEM-Analyse ermittelten Spannungswerte mit der von der Geometrie, dem Werkstoff und dem Belastungskollektiv abhängigen Bauteilfestigkeit verglichen. Dabei sind Sicherheitsfaktoren, die von der Art der Prüfung, dem Gefährdungspotenzial im Schadensfall und der Duktilität des Werkstoffes abhängen, zu berücksichtigen. Der sich aus dem Vergleich ergebende Auslastungsgrad darf 100 % nicht überschreiten. Zum schnelleren Einarbeiten in die Thematik sind die für Gusseisen spezifischen Inhalte in [29] verdichtet.

Weitere Regelwerke zur Bemessung von Gussteilen sind im Abschnitt 2.1.4 aufgeführt.



Bild 27: Rotorhohlwelle für 5MW-Windenergieanlage im Offshore-Einsatz aus der kaltzähnen Legierung EN-GJS-400-18-LT für den Einsatz bei tiefen Temperaturen, Gewicht 37 t (Bild: Walzengießerei Coswig)

2.2.6 Gießtechnische Simulation

Das Konstruieren mit CAD dient der schnellen, übersichtlichen und sicheren Geometrierzeugung. 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 Gusstück im Rechner zu simulieren und gegebenenfalls zu verbessern. Die Berechnung des Gießprozesses umfasst:

- die Formfüllung,
- das Erstarren des flüssigen Eisens,
- die Gefügeumwandlungen und Eigenschaftsverteilung im erstarrten Zustand,
- die Verformungen und Eigenspannungen des Rohgusses.

Als Ergebnisse der Simulation sind zu nennen die Strömungs- und Temperaturverteilung während der Formfüllung, potentielle Ungenzen, Erstarrungsdauer des Gusstückes, Gefügeausbildung und mechanische Eigenschaften im Gusstück. Ohne diese Simulation wären beispielsweise Informationen über die Turbulenzen und die Druckverhältnisse in der heißen Schmelze überhaupt nicht erfassbar. Mit Hilfe dieser und weiterer Ergebnisse lässt sich der Gießprozess im Rechner optimieren. Falls Problemstellen angezeigt werden, so können das Speise- und das Gießsystem verändert und die Auswirkungen nach einem erneuten Rechenlauf objektiv beurteilt werden. Seit kurzem ist für diese Aufgabenstellung eine Optimierungssoftware verfügbar, die zudem Randbedingungen wie die Minimierung des Verzuges berücksichtigen kann.

Die Programme zur Formfüllungs- und Erstarrungssimulation sind aufgrund der heute zur Verfügung stehenden Rechner-technologien und der berücksichtigten Randbedingungen des Gießprozesses in der Lage, in relativ kurzer Zeit hervorragende Simulationsergebnisse zu liefern (**Bild 28**). 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.

Anhand der Ergebnisse der gießtechnischen Simulation können die Wärmezentren des Gussstückes schnell erkannt werden. Diese Aussagen sind für den Gießer beim Auslegen des Gieß- und Speisesystems sehr hilfreich. 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. Fertigungsrisiken werden durch die vergleichsweise schnelle und kostengünstige Überprüfung und Optimierung in der virtuellen Welt weitgehend ausgeschlossen.

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 dem Zulieferer nicht bekannt sind, muss es komplett geprüft werden. Aber auch dann besteht keine Sicherheit bezüglich der Problemstellenerkennung.

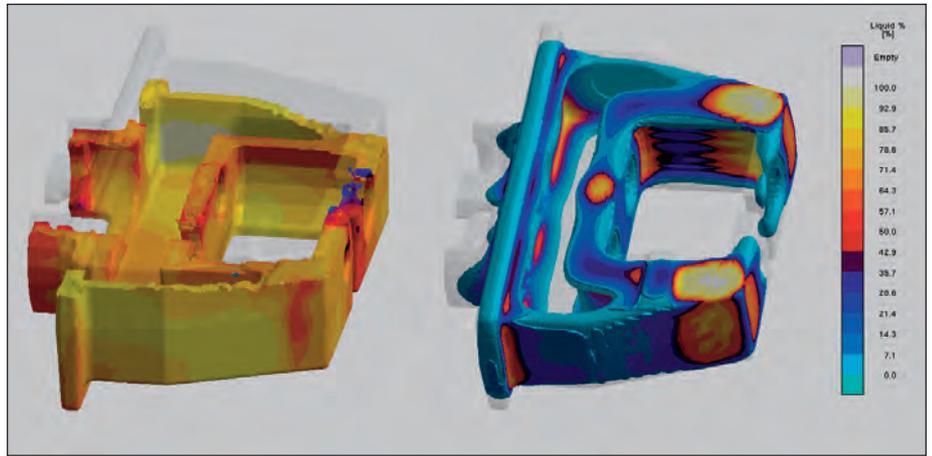


Bild 28: Formfüllsimulation mit Temperaturverteilung im Flüssigeisen (links) und Erstarrungssimulation mit Temperaturverteilung in der Restschmelze (rechts). Die bereits erstarrten Bereiche sind ebenso wie das Speise- und Gießsystem ausgeblendet.

2.2.7 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.

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 (**Bild 29**). 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. Weiterhin wird eine Kollisionskontrolle durchgeführt.

Auch für den Bereich der mechanischen Bearbeitung führt die in der virtuellen Welt vorgenommene Fertigungssimulation zu gesteigerter Sicherheit, verringerten Einfahrzeiten und somit zu kürzeren Durchlaufzeiten und geringeren Kosten.

2.2.8 Rapid Prototyping

Die schnelle Marktpräsenz ist häufig von entscheidender Bedeutung für den Produkterfolg. Diese Anforderung führt bei gleichzeitig wachsenden Qualitätswünschen zu zusätzlichem Termindruck und verlangt neue Lösungsansätze. Prototypen unterstützen den Entwicklungsprozess und dienen zur Überprüfung von Design und Funktion in einer frühen

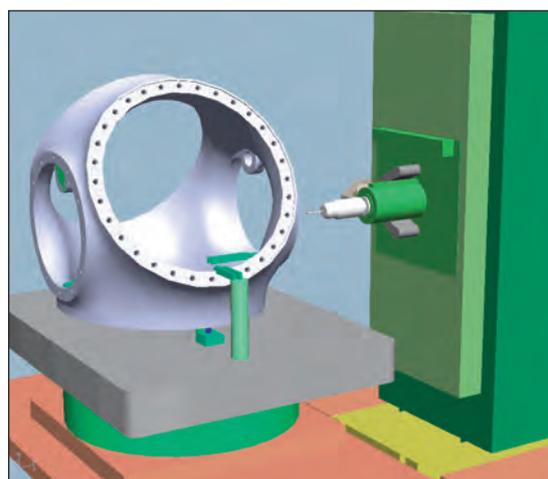


Bild 29: Ausschnitt aus der Bearbeitungssimulation eines Gehäuses in einem flexiblen Fertigungssystem



Bild 30: Aus Formstoffblöcken gefrästes Formsegment mit Kern (links) und daraus in Rekordzeit ohne Modelleinrichtung gefertigter Prototyp eines Schwenktischgehäuses (rechts) (Bild: Heidenreich & Harbeck, Mölln)

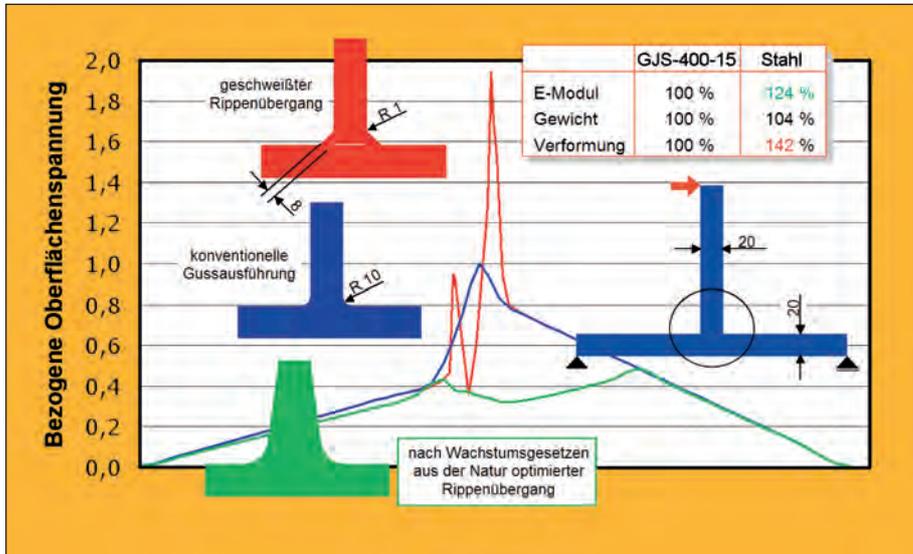


Bild 31: Vergleichende Betrachtung der Gestaltung eines T-Profils in Schweiß- und Schmiedestahlausführung mit einem Gussteil aus GJS-400-15

Entwicklungsphase. Die schnelle Verfügbarkeit von physischen Modellen trägt zum Verkürzen der Planungsphasen und zum Optimieren der Produkteigenschaften bei. Hier kommt den Rapid-Prototyping-(RP-)Technologien entscheidende Bedeutung zu.

Unter Rapid Prototyping versteht man solche Verfahren, mit denen Modelle, Formen und/oder Kerne schichtweise direkt aus dem 3D-CAD-Geometriedatensatz aufgebaut werden. häufig angewendete Verfahren sind die Stereolithographie, das Lasersintern von Kunststoffmodellen oder Sandformen und -kernen, Fused Deposition Modeling, Laminated Object Manufacturing, Direct Shell Production Casting und 3D-Plotting. Aufgrund der beschränkten Arbeitsräume der RP-Anlagen ist bei größeren Bauteilen das direkte Fräsen von Formen und Kernen aus Formstoffblöcken eine interessante Alternative (Bild 30).

2.2.9 Gestaltungsfreiheit

Gegenüber konkurrierenden Verfahren besitzt das Fertigungsverfahren Gießen den Vorteil der nahezu unbegrenzten Gestaltungsfreiheit. Auch komplizierte Geometrien lassen sich in der Regel wirtschaftlich herstellen, da ein eventuell erforderlicher hoher Formgebungsaufwand nur einmalig, nämlich bei der Herstellung des Gießereimodells, anfällt. Durch Weglassen unbelasteter oder das gezielte Verstärken von stärker belasteten Bauteilbereichen sowie der Abkehr von plattenartigen, rechtwinkligen Strukturen kann die ideale Bauteilfunktion mit dem Fertigungsverfahren „Gießen“ am besten realisiert werden.

Insbesondere bei Gusseisen mit Kugelgraphit kann der gegenüber Stahlschweißkonstruktionen etwas niedrigere E-Modul durch den Nutzen der Gestaltungsfreiheit weit mehr als nur kompensiert werden. Die für ein einfaches mit einer Querkraft beaufschlagtes T-Profil dargestellten Vor-

teile (höhere Festigkeit dank niedriger Oberflächenspannungen sowie höhere Steifigkeit bei vergleichbarem Bauteilgewicht) lassen sich durchaus auch auf komplexe Bauteile übertragen, wenn die Möglichkeiten zur beanspruchungsgerechten Formgebung genutzt werden (Bild 31).

Bei anspruchsvollen Entwicklungszielen sollte die Topologieoptimierung zur Anwendung kommen, um eine Vorstellung von der Idealgestalt für die gewünschte Bauteilfunktion zu erhalten (Bild 32). Bei der Umsetzung dieses Gestaltungsvorschlages in eine wirtschaftliche Gusskonstruktion sind dann noch fertigungstechnische Aspekte wie Gießlage, Herstellbarkeit der Werkzeuge und Kerne sowie Montierbarkeit der Form zu berücksichtigen. Letztendlich sollte auch bereits anhand des virtuellen Prototypen verifiziert werden, dass das Bauteil gieß-, strahl-, putz- und lackiergerecht konstruiert wurde. Als Entwicklungspartner kann die ausführende Gießerei die Gussteilentwicklung ganz oder teilweise übernehmen. Zumindest aber steht sie ihren Kunden gern beratend zur Seite, damit anspruchsvolle Bauteile wie im Bild 33 abgebildet entstehen können.

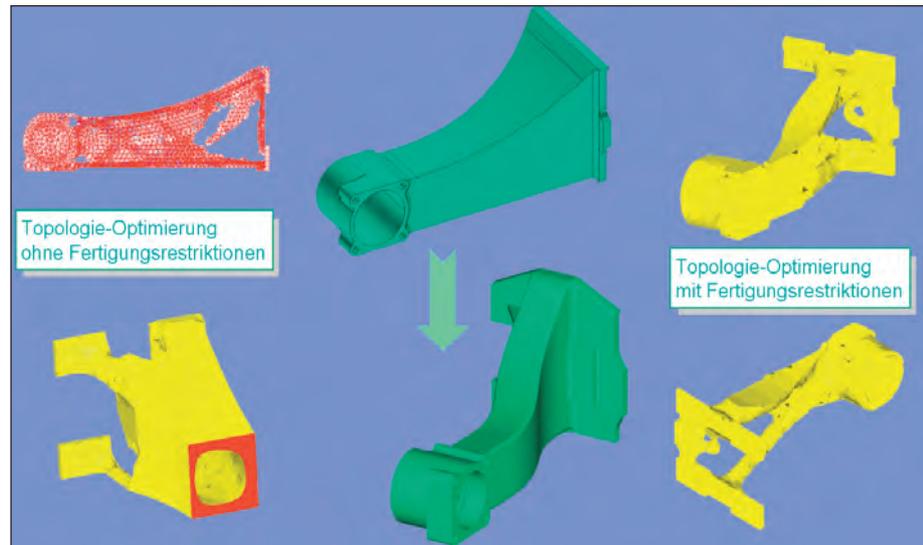


Bild 32: Topologieoptimierung eines gewichtsreduzierten Tragarmes für Papierabrollungen (Bild: Heidenreich & Harbeck, Mölln)



Bild 33: Beispiele für simulativ optimierte Gussteile (Bilder: Heidenreich & Harbeck, Mölln)
 a) besonders maßhaltiges Rundtischgehäuse für eine Bearbeitungsmaschine
 b) Gestalts- und gewichtsoptimierter Schließhebel für Kunststoffspritzgießmaschine

3 Gießtechnik

Für das Herstellen von Gusseisenteilen durch Gießen kommen grundsätzlich zwei Verfahrensgruppen für die Formherstellung zur Anwendung, die Sandformen, die nach dem Abguss zerstört werden (verlorene Formen), um das Gussteil zu entnehmen, und die metallischen Kokillen (Dauerformen), die zwei- bis mehrteilig sind und zur Gussentnahme geöffnet werden. Der in diesen Formen vorzusehende Hohlraum, der dem späteren Gussteil entspricht, ist bei den metallischen Kokillen spanend ausgearbeitet. Bei den Sandformen werden Modelle, die ein Abbild des Gussteils darstellen, in den Formstoff eingearbeitet, die nach ihrer Entnahme den Formhohlraum als Negativ des Gussteils freigeben, in den das Gießmetall eingegossen wird.

Zur Abbildung von Innenhöhlräumen im Gussteil kommen Kerne zur Anwendung (Bild 34). Sie werden aus geeigneten Sand gebundenen Formstoffen gefertigt, die in die Form lage- und passsicher eingelegt werden. Die Herstellung dieser Kernteile, die neben den Innenhöhlräumen auch im Außenbereich der Form bei Hinterschnitten zum Einsatz kommen können, benötigt eine meist mehrteilige Kernkasteneinrichtung zur maßgenauen Fertigung. Komplexe und biegegefährdete Kerne können mit Kernstützen zusätzlich an mit dem Kunden vereinbarten Stellen abgesichert werden (Bild 35).

Zum Füllen der Form ist ein Gießlauf erforderlich, durch den das Metall in die Form gelangen kann. Da der Formfüllungsprozess Einfluss auf die Gussteilqualität hat, ist diese als Anschnitt- oder Gießsystem bezeichnete ein- oder mehrkanalige Öffnung für die Formfüllung genau zu dimensionieren und am Gussteil dort anzubringen, wo es gieß- und fertigungstechnisch erforderlich ist. Das Anschnitt- oder Gießsystem wird nach dem Guss entfernt. Es besteht im Allgemeinen



Bild 35: Herdform mit eingelegten Kernen, die wegen ihrer Größe und Masse mit Kernstützen abgesichert sind (Bild: Meuselwitz Guss)

aus dem Trichter, einem oder mehreren Läufen und Anschnitten, die Bestandteil der Modelleinrichtung sind oder aus feuerfesten Kanalsteinen, die im Baukastensystem zusammengesetzt werden.

Die Querschnitte der einzelnen Bestandteile sind nach den Gesetzen der Hydromechanik genau berechnet, um ein möglichst laminares und gesteuertes Einfließen der Schmelze in den Formhohlraum zu ermöglichen. Die Anpassung an die physikalischen Gesetzmäßigkeiten des Fließens von Flüssigkeiten und die Gussteilgestalt erfolgt nach gießereitechnischen Erfahrungen und wissenschaftlich technischen Untersuchungen und gehört zum Aufgabengebiet der ausführenden Gießerei. Mit der numerischen Simulation der Formfüllung am Computer ist es heute der Gießerei möglich, die komplexen Vorgänge der Guss speisung im Zusammenhang zu den abkühlungsbedingten Speisungsvorgängen exakt vorherzubestimmen [13].

Die Temperatur, mit der die Schmelze durch das Gießsystem in den Formhohlraum eingefüllt wird, liegt um einen be-

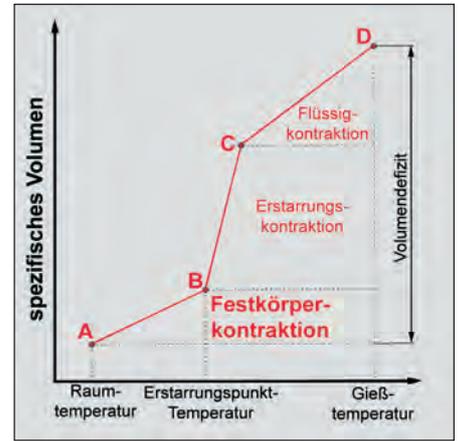


Bild 36: Volumenkontraktion beim Erstarren einer Legierungsschmelze (nach [13])

stimmten Betrag über der Temperatur, bei der die Erstarrung einsetzt, um die Form sicher füllen zu können, denn der Abkühlungsprozess setzt sofort nach der Schmelzeentnahme aus dem Ofen ein. Der Abkühlungs- und Erstarrungsprozess einer Schmelze ist mit einem Volumendefizit verbunden, das werkstoffabhängig ist. Dieser Prozess setzt sich aus drei Stufen zusammen (Bild 36), die gießtechnisch berücksichtigt werden müssen, soll ein dichtes lunkerfreies Gussteil entstehen. Die zuerst auftretende Flüssigkontraktion kompensiert das Volumendefizit mit nachspeisender Schmelze aus dem Gieß- und Speisesystem. Bei der zweiten Stufe, der Erstarrungskontraktion, beginnt die Schmelze von außen nach innen fest zu werden. Dabei tritt weiterhin eine Volumenkontraktion auf, die, solange Schmelze vom Gießsystem oder Speiser nachfließen kann, kompensiert werden kann. Wenn in späteren Stadien außen herum das gesamte Metall bereits erstarrt ist, können im Inneren fein verteilte (Mikrolunker) und/oder zu großen (Makrolunker) Blasen und an der Außenseite Einfallstellen als Folge der nun behinderten Schrumpfung entstehen.

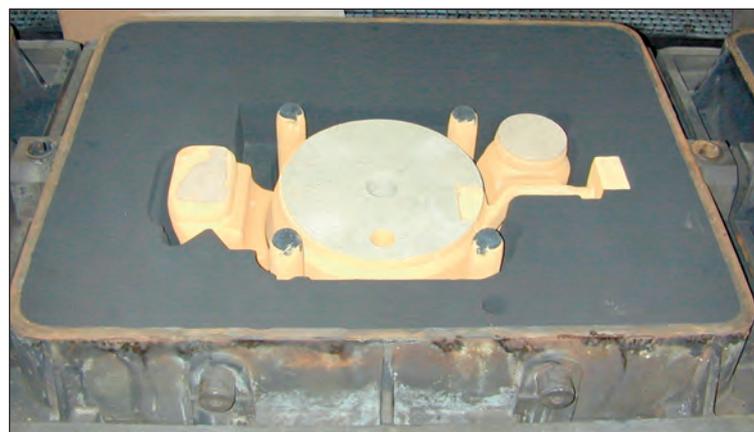


Bild 34: Der Unterkasten einer Sandform mit eingelegtem Innenkern (Bild: Heidenreich & Harbeck, Mölln)



Bild 37: Modell eines Getriebegehäuses auf Modellplatte mit Speisern und Kühlkokille (Bild: Heidenreich & Harbeck, Mölln)



Bild 38: Moderne Formanlage für das Herstellen von Seriengussteilen in Sandformen

Diese bauteilseitig nicht erwünschte, aber physikalisch nicht vermeidbare Lunkerung lässt sich weitestgehend durch Vorsehen zusätzlicher Speisungsmöglichkeiten (sogenannte Speiser) mit einem so großen Querschnitt, dass durch die dort zuletzt erfolgende Speisung die Lunker aus dem Gussteil in den Speiser verlagert werden, beseitigen (**Bild 37**). Hierfür kann auch das Gießsystem genutzt werden. Der Werkstoff Gusseisen mit Kugelgraphit weist gegenüber anderen Gusswerkstoffen ein geringeres Schwindungsverhalten auf und damit eine geringere Lunkerneigung. Vielfach kann sogar ohne Speisung lunkerfrei gegossen werden. Da aber die Lunkerneigung stark von der Gusskonstruktion abhängt, lässt sich in vielen Fällen eine günstigere Lösung in der gießgerechten Anpassung des Bauteils finden. So kann sie beispielsweise durch entsprechende konstruktive Maßnahmen, wie Vermeidung großer Wanddickenübergänge und anderer masseintensiver Bereiche sowie durch Vorsehen einer schwindungskompensierenden Gussteilkonstruktion verringert oder sogar vermieden werden.

Der dritte Bereich, die Festkörperkontraktion, findet im allseits erstarrten Gussteil statt, bis die Raumtemperatur erreicht ist. Sie ist über den Wärmeausdehnungskoeffizienten des Werkstoffs genau definiert und findet in einem Aufmaß an der Modelleinrichtung oder Kokille, dem sogenannten Schwindmaß Berücksichtigung.

Wie die Prozesse der Formfüllung sind auch die Erstarrungsvorgänge heute simulativ hochgradig für die betreffende Gusskonstruktion vorherbestimmbar. Den zu erwartenden Lunkerstellen kann so bereits im Stadium der Bauteilentwicklung gemeinsam mit dem Kunden durch konstruktive Anpassungen entgegen gewirkt werden. Da das allerdings bei komplexen Gusskonstruktionen oft nicht möglich ist, haben die Gießereien basierend auf umfassenden Untersuchungen Möglichkeiten zur gerichteten oder gelenkten Erstarrung entwickelt.

Weitere Einflussfaktoren auf die Gussteilausführung haben die Formverfahren. Während bei der Gussfertigung in Sandformen kaum gestaltungsseitige Restriktionen für die Gussteile bestehen, da die Sandformen nach dem Erstarren des Gussteils zur Gussentnahme zerstört werden (verlorene Formen), Hinterschnidungen am Modell durch Kernteile und Innenbereiche mit Kernen abgeformt werden können, muss bei den nichtzerstörbaren Dauerformen die Kokillenöffnung und Gussentnahme ohne Hinterschnitte abgesichert werden, was diesem Verfahren zusammen mit den teureren Werkzeugen (metallische Kokillen) Einsatzfälle in speziellen Nischenbereichen, wie dem Strang-, Schleuder- aber auch dem Schwerkraftformguss bringt, wo die spezifischen Eigenschaften des Kokillengusses ausgenutzt werden. Die Sandformverfahren dominieren hier deutlich in der Anwendung, da sie wirtschaftlicher, flexibler und universeller für fast alle Gussortimente einsetzbar sind.



Bild 40: Herstellung einer Grubenform für ein sehr großes Gussteil (Bild: Meuselwitzguss)



Bild 39: Eine mehrteilige kastengebundene Sandform beim Zulegen des nächsten Formkastenteiles, Kern (hell) (Bild: Meuselwitzguss)

3.1 Sandformverfahren

Die Sandgussfertigung hat in den letzten Jahrzehnten bedeutende Fortschritte gemacht. Neben den technischen Verbesserungen bei der Herstellung von Seriengussteilen auf Formanlagen (**Bild 38**) und deren Formstoffen können heute durch die verbesserten Verdichtungsparameter und Formstoffe auch Gussteile mit eingegengten Toleranzen, hoher Reproduzierbarkeit und mit einer hohen Oberflächenqualität gefertigt werden, die mit der Gießerei vereinbart werden können.

3.1.1 Nasssandformverfahren

Für die maschinelle Sandgussfertigung mit einer zweiteiligen Modelleinrichtung und zweigeteiltem Formkasten ist von Vorteil, dass gestaltseitig die kaum eingegrenzte Formgebung den Konstrukteuren bei der Gestaltung komplexer Gusskonstruktionen entgegenkommt. Zudem ist das Maschinenformen auf automatisch arbeitenden Anlagen hochproduktiv und hat durch die gegenüber den hitzebeständigen Kokillen preiswerte Modelleinrichtung, die, da sie nicht mit dem heißen Metall in Berührung kommt, aus kostengünstigeren Materialien (Holz, Kunststoffen und Leichtmetall) gefertigt werden kann, auch wirtschaftliche Vorteile. Deshalb wird heute der überwiegende Anteil der Eisengusserzeugnisse im Sandformverfahren gefertigt. Restriktionen bezüglich der Fertigung auf Formanlagen kommen vor allem durch die anlagenspezifisch vorgegebene Formkastengröße, Formkastenteilung und Seriengröße, die eine Fertigung auf Anlagen ermöglicht. Dafür sind engere Toleranzen erzielbar und sehr wirtschaftlich Seriengussteile herstellbar als beim Handformguss.

Hieraus kann eine Einteilung der Gussfertigung abgeleitet werden. Mittlere und große Serien von klein- und mittelgroßen Gussteilen sind auf Formanlagen wirtschaftlich herstellbar. Als Formstoff kommt hier meistens ein tongebundener Nass-

sand und im geringen Umfang auch chemisch verfestigter Formstoff, der in einem Kreislauf vollständig wiederverwendet wird, zur Anwendung.

Einzelteile und Kleinserien von kleinen und mittelgroßen Gussteilen, aber vielfach auch größerer Teile, wenn es die Anlagentechnik und Formkastengröße zulässt, werden in mechanisierten Handformereien gefertigt. Aber auch große Einzelteile werden, soweit es die technisch nutzbare Formfläche im verfügbaren Formkasten zulässt, in entsprechend großen Formkästen und sehr große Teile in Formgruben in manueller Handfertigung unter Nutzung selbst aushärtender Kaltharzformstoffe hergestellt (**Bilder 39 und 40**). Bei Teilen, die größenseitig außerhalb des genormten Bereiches liegen, sind die Gussteilparameter (Eigenschaften, Oberfläche, Maßgenauigkeit, Toleranzen usw.) mit der Gießerei zu vereinbaren.

Auch hier kommen zum Abbilden der Innenhohlräume Kerne zum Einsatz, die wie die Formen aus Sand sind und nach dem Gießen infolge der verbrannten Binderbestandteile entfernt werden können und dabei den Innenhohlraum des Gussteils freigeben (**Bild 41**). Wegen der enormen Hitze- und Druckbelastung beim Gießen werden die Kerne heute ausschließlich aus chemisch kalt oder warm verfestigten Formstoffen gefertigt. Für die Serienfertigung stehen moderne Maschinensysteme und eine Vielzahl von Verfahren unterschiedlicher Kernvolumina zur Verfügung, von denen sich das Urethan-Cold-Box-Verfahren am stärksten durchgesetzt hat. Für besonders anspruchsvolle, dünne und bruchgefährdete Kerne kommt das Maskenformverfahren als heißhärtendes Kernfertigungsverfahren zum Einsatz. Einzel- und Kleinserien werden wie die Großkerne auch von Hand gefertigt und an Luft ausge-



Bild 41: Grubenform mit hinten links bereits eingelegten Innenkernen für ein Gussteil Querbalken für Portalfräsmaschine aus EN-GJS-600-3 (Bild: Gontermann-Peipers, Siegen)

härtet. Der Altsand aus dem Form- und Kernformprozess kann Ressourcen schonend wiederaufbereitet und im Formprozess eingesetzt werden. Sandgeformte Gussteile finden wegen ihres großen Gestaltungsfreiraumes sowie hoher Wirtschaftlichkeit und Produktivität in allen technischen Bereichen Anwendung.

3.1.2 Vollformgießverfahren

Eine Sonderform des Sandformverfahrens stellt das Vollformgießen dar. Das Verfahren unterscheidet sich dahingehend von den anderen Sandgussverfahren, dass in die Sandformen ein Schaumpolystyrolmodell des Gussteils eingeformt wird, welches durch das einfließende Gießmetall ausgebrannt und der freiwerdende Raum von dem Gießmetall eingenommen wird (**Bild 42**). Neben der nach dem Erstarren der Schmelze zu einem formstabilen Gussteil entfernten Sand-

form (verlorene Form) wird somit auch das Modell zerstört (verlorenes Modell). Das Verfahren ist bedingt durch das aufgeschäumte, aber sehr leichte Modell besonders für die Anfertigung großvolumiger Teile geeignet. Als Faustformel gilt ein unterer Massebereich von etwa 50 kg. Nach oben restringieren die Modellstabilität, -größe und die Schmelzekapazität das Anwendungsfeld.

Diese Vorgehensweise erfordert zwar für jedes Gussteil ein Modell, ist im Hauptanwendungsbereich vom Einzelteil bis zur Kleinserie aber vielfach kostengünstiger als bei der konventionellen Fertigung mit Dauermodelleinrichtung und Kernkästen. Zudem sind die geschäumten Modelle und damit auch der Guss innerhalb von Tagen verfügbar, während die Anfertigung eines Gussmodells mehrere Wochen bis Monate in Anspruch nimmt.

Für den Konstrukteur interessant ist, dass wegen des in der Form verbleibenden Modells auch ohne Aushebeschrägen, Formteilungen und Kerne gearbeitet werden kann. Hohlräume und Hinterschneidungen können direkt gegossen werden, da das Modell beim Gießprozess zerstört wird. Damit eignet sich dieses Verfahren vor allem für Gussteile mit sehr komplexer Außen- und Innenkontur, bei denen Bohrungen, Schlitze und andere Öffnungen vorgegossen werden sollen. Durch die hohe Gratfreiheit und das endabmessungsgenaue Gießen sind Wanddickenverringerungen mit Masseinsparungseffekten möglich. Zudem verringert sich der Bearbeitungsaufwand durch das gratfreie und bearbeitungsgenaue Gießen mit verringerten Toleranz- und Bearbeitungszugaben. Weiterhin ermöglicht der erweiterte Gestaltungsspielraum die Fertigung komplexer Integralgussteile, wobei mehrere Füge-teile unter Einsparung der Fügeaufwendungen in ein Gussteil integriert werden können.



Bild 42: Mehrteiliges Schaumstoffmodell für ein Planetengetriebegehäuse-Gussteil eines Schiffsantriebes, bestehend aus Ober- und Unterteil (links) und das im Vollformverfahren abgegossene Gussteil (rechts), Abmessungen 3,5 x 2,7 x 2,45 m, Gesamtgewicht 18 t (Bild: Römheld & Moelle, Mainz)

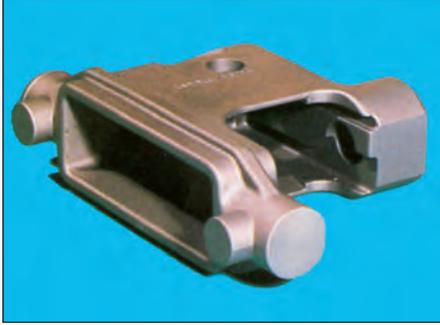


Bild 43: Nagelstangenpendel für Textilmaschine aus Feinguss, Werkstoff EN-GJS-400-15, Gewicht 230 g (Bild: ZGV, Düsseldorf)

3.1.3. Feingießverfahren

Gusseisen mit Kugelgraphit kann auch im Feingießverfahren verarbeitet werden. Das ermöglicht neben der Nutzung moderner Rapid-Prototyping-Techniken zur schnellen Gussbereitstellung vor allem die Herstellung endabmessungsnaher und hoch komplexer Bauteile im Massebereich von wenigen Gramm bis 100 kg. Beim Feingießen werden Wachsmodele von den Gussteilen angefertigt, die mit einer keramischen Maske überzogen werden, die nach dem Aushärten und Ausschmelzen der Wachsteile eine einteilige gießfähige Form ergeben, die ohne Hinterfüllung abgegossen werden kann. Die Verwendung dieser sogenannten Ausschmelzmodelle lässt die Fertigung selbst komplizierter und filigraner Bauteile mit Hinterschneidungen und komplexen Innenräumen zu, die zudem wegen des feinen Keramikformstoffes gegenüber normalen Sandgussteilen eine sehr saubere Oberfläche aufweisen, so dass vielfach auf eine Bearbeitung verzichtet werden kann. Allerdings ist die anlagentechnisch aufwändige Feingussfertigung ein typisches Serienfertigungsverfahren. Aber die Anwendung moderner Rapid-Prototyping-Techniken zur Wachsmodele- und Gießformenfertigung lassen auch Kleinserien und die Losgröße eins heute vielfach wirtschaftlich herstellbar werden. Hier sollte frühzeitig der Kontakt zur Feingießerei gesucht werden [35].

Das Feingießverfahren erlaubt dem Konstrukteur ein Höchstmaß an gestalterischer Freiheit. Durch die enge Zusammenarbeit zwischen Konstrukteur und Kunden lassen sich hier optimale Bauteillösungen schaffen. So können vielfach komplizierte Baugruppen durch feingegossene Teile ersetzt werden. Aus Gusseisen mit Kugelgraphit werden solche Bauteile gefertigt, an die neben Gleit-, Notlauf- und Dämpfungseigenschaften hohe Anforderungen an die Zähigkeit und Festigkeit gestellt werden (**Bild 43**).

Für weiterführende Informationen über das Feingießverfahren ist bei der Zentrale für Gussverwendung ein Sonderdruck erschienen [36].

3.2 Dauerformverfahren

Im Gegensatz zu den Sandgießverfahren, bei denen die Gießformen nach dem Abguss zur Gussteilentnahme zerstört werden, sind metallische Dauerformen (Kokillen = französisch Schale) aus Guss-eisen oder Stahl nicht zerstörbar. Sie sind zwei- oder mehrteilig ausgeführt und müssen nach der Schmelzerstarrung aufgeföhren werden, um die Gussteile entnehmen zu können (**Bild 44**). Gegossen wird von oben (fallender Guss), wie im Bild gezeigt, von den Seiten oder von unten (steigender Guss). Gegenüber dem Sandguss wird hier keine Modelleinrichtung (zwei- oder mehrteilige Positivmodelle des Gussteils) benötigt. In die wegen der Gussentnahme mehrteilige Kokille ist der Gushohlraum mit Einguss- und Speisesystem bereits eingearbeitet, was sich allerdings in hohen Kokillenkosten widerspiegelt und diese Gießtechniken wirtschaftlich nur im Serien- und Großserienbereich einsetzbar macht. Heute sind aber auch schon wirtschaftliche Lösungen für den Kleinserienbereich vorhanden, die mit der Gießerei abgestimmt werden können und vom Gussortiment abhängen. Sandkerne und -teile sind dagegen verwendbar [37].

Wegen der Unzerstörbarkeit der Kokille sind die Dauerformverfahren konstruktiv auf solche Bauteile eingegrenzt, die ohne Hinterschneidungen auskommen, oder wo die Hinterschneidungen mit Kernen und Einlegeteilen abbildbar sind. Trotzdem haben die Kokillengießverfahren auch bei den Eisengusswerkstoffen eine gewisse, wenn auch gegenüber den Sandgussverfahren verschwindend geringe Anwendungsbreite erreicht, denn die hohe Abkühlgeschwindigkeit, durch die

gegenüber den Sandformverfahren höhere Wärmeleitfähigkeit des metallischen Kokillenwerkstoffs hervorgerufen, ist das kennzeichnende Merkmal des Verfahrens. Die dadurch erzielte schnelle Abkühlung des Gussteils führt in der Erstarrungsphase zu einem sehr feinkörnigen und dichten Gefüge mit hoher Gleichmäßigkeit und einem engen Streubereich der erzielbaren Eigenschaften, die für spezielle Anwendungsfälle ausgenutzt werden. Man spricht deshalb von einem Kokillengießverfahren, wenn der Kokillenwerkstoff eine Wärmeleitfähigkeit von $> 40 \text{ kJ/m} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$ aufweist. Die möglichen Verfahrensvarianten, die auch bei Gusseisen mit Kugelgraphit Anwendung finden, sind das Kokillen-, Schleuder- und Stranggießen [38].

3.2.1 Kokillengießverfahren

Unter dieser Bezeichnung wird im Guss-eisenbereich ausschließlich das Schwerkraftgießen in ein-, zwei- und mehrteiligen metallischen Dauerformen verstanden (siehe **Bild 44**). Hier wird der schon oben angesprochene Vorzug der schnellen Erstarrung des Gussteils über die metallische Kokille mit seiner gleichmäßigen feinen Gefügeausbildung mit dessen Auswirkungen auf die Gussteileigenschaften und seine Weiterverarbeitung ausgenutzt. Das Kokillengießverfahren kommt deshalb dort zur Anwendung, wo die Gussteilgestalt eine Fertigung in Dauerformen zulässt und wo hohe Festigkeiten bei gleichzeitig guter Zerspannung gefordert sind.

Wegen der hohen Abkühlgeschwindigkeit mit typisch exogen-dentritischer Erstarrung entsteht ein sehr feines Gefüge mit einer höheren Zahl an kleineren dentritischen Zellen gegenüber der Gussferti-

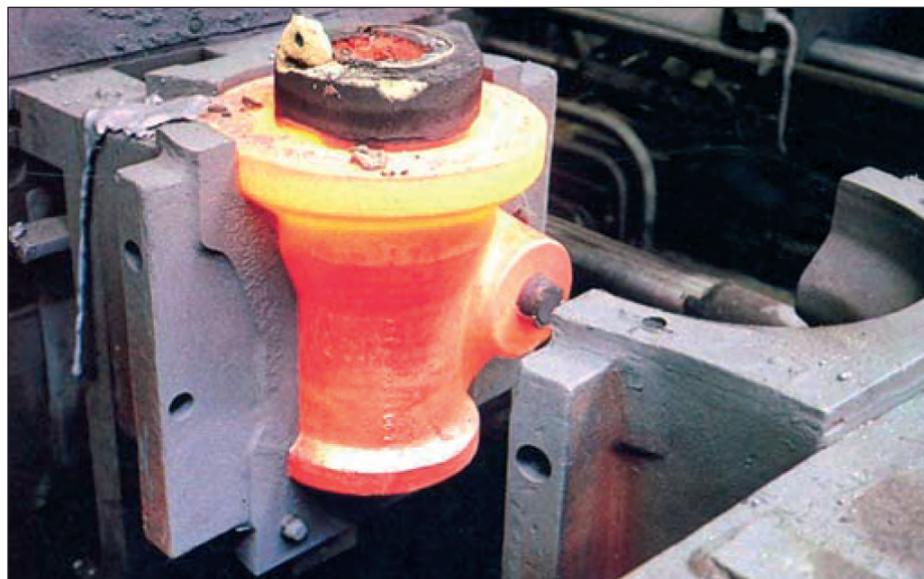


Bild 44: Zur Gussentnahme geöffnete Kokille mit noch rotglühendem Gussteil (Bild: Bosch Rexroth, Lohr)

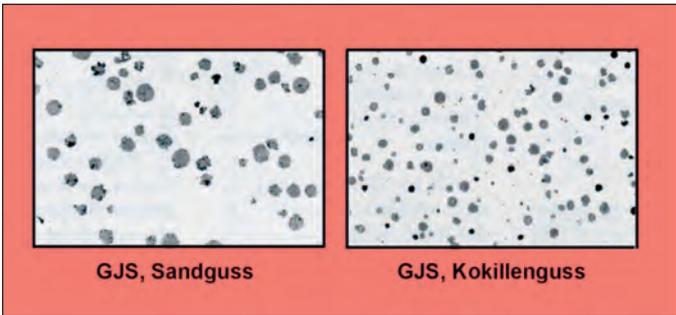


Bild 45: Typische Gefügeausbildung bei einem Gusseisen mit Kugelgraphit (GJS) in Sandformen (links) und in Kokille (rechts) gegossen [1]



Bild 46: Steuerblock für den Antrieb einer Spindelpresse aus GJS-Kokillenguss, Gewicht etwa 10 t, Abmessungen 1350 x 1020 x 950 mm (links) und Erdergehäuse aus Gusseisen-Kokillenguss für eine SF6-isolierte Freiluftschaltanlage zur Stromdurchleitung, montagefertig in der Gießerei bearbeitet, Gewicht 32 kg (rechts) (Bosch-Rexroth, Lohr)

gung in sandgebundenen Formen. Bei GJS bilden sich sehr viele und kleine Kugeln (Sphäroliten) (**Bild 45**). Bei weitestgehend eutektischer Erstarrung treten kurze Diffusionswege auf, so dass im eutektoiden Bereich feinverteilter Perlit oder Ferrit bereits im Gusszustand anfallen. Die Erstarrung kann durch entsprechende Kühlung oder Aufheizung der betreffenden Kokillenbereiche in weiten Grenzen auf die Bedürfnisse des Gussteils eingestellt werden [39]. Durch den fein verteilten Kugelgraphit weist der GJS-Kokillenguss bessere Dehnungs- und Schlagzähigkeitswerte und eine absolute Dichtheit auf.

Auf Grund der speziellen Verfahrenstechnik ist die übliche Freimaßtolerierung nicht anwendbar. Die Maße sollten deshalb in Abstimmung mit der Gießerei toleriert werden. Kokillenguss aus Gusseisen ist nicht genormt. Es lassen sich prinzipiell alle Gusseisensorten nach **DIN EN 1564** im Großserienbereich gießen, vor allem aber die nahe eutektischen bis schwach übereutektischen Legierungen. Einige Firmen verwenden auch Firmen spezifische Bezeichnungen. Sie fertigen gegebenenfalls auch Sonderlegierungen, die auf Anfrage erhältlich sind.

Der GJS-Kokillenguss ist wegen seiner feinen Gefügestruktur absolut dicht, wie es für Ölhydraulik-Bauteile erforderlich ist. Dafür verantwortlich ist der hohe Widerstand der starren Kokille gegen den bei der Erstarrung auftretenden Graphitisierungsdruck, dessen Volumenzunahme die bei der Erstarrung auftretende Schwindung kompensiert. Andererseits weist dieser Werkstoff höhere Streckgrenzen gegenüber gleichfesten Stahlsorten auf. Der Hochdruckbereich in der Hydraulikindustrie mit größer 250 bar Dauerbelastung ist deshalb ein typisches Anwendungsgebiet für GJS-Kokillenguss. Guss für die Antriebshydraulik von Stromschaltanlagen ist hier ein weiteres großes Ein-

satzfeld. Druckdichter Pumpenguss nutzt das gleiche Eigenschaftsspektrum aus (**Bild 46**).

Ein wichtiger Anwendungsbereich ist zudem die Energietechnik, wo gasdruckdichte Gussteile zum Einsatz kommen, deren Dichtheit über Jahre gewährleistet werden muss, damit ein Druckabfall durch porösen Guss nicht die Sicherheit der Energieanlage beeinträchtigt. Zudem ergeben sich Oberflächengüten nach dem Bearbeiten, die mit Sandgussteilen wegen der größeren Kornverteilung nicht erreichbar sind, was Anwendungen im Präzisionsmaschinen- und Formenbau schätzen. Die Oberflächen können sogar poliert werden.

3.2.2 Schleudergießverfahren

Beim Schleudergießen wird das schmelzflüssige Metall in eine sich drehende Kokille (metallische Form) gegossen (**Bild 47**). Dabei kann die Drehachse senkrecht oder waagrecht liegen. Bei senkrechter Drehachse ist die Kokille mit einem Boden versehen, und es können Voll- und Hohlkörper gefertigt werden. In Kokillen mit waagerechter Drehachse werden aus-

schließlich Hohlkörper in Form von Rohren hergestellt. Die Kokille bildet die äußere Wandung, welche durch die Reibungskräfte das flüssige Metall mitnimmt. Die auftretende Zentrifugalkraft presst das flüssige Metall an die innere Wandung des Gussteils und formt dabei eine gleichmäßige Wanddicke aus. Da sich der innere zylindrische Hohlkörper stets zentrisch um die rotierende Achse ausbildet, die Außenfläche sich aber nicht zentrisch zur rotierenden Achse drehen muss, können auch Körper mit unterschiedlichen Wandungen geschleudert werden. Abhängig von der gewünschten Wanddicke, den Abkühlungsbedingungen und der Gießtemperatur erfolgt der weitere Schleudergussprozess, bis der Gusskörper erstarrt ist und entnommen werden kann [13, 40].

Mit dem Schleudergießverfahren lassen sich verfahrensbedingt hauptsächlich rotationssymmetrische Teile wie Buchsen, Rohre und Walzen als Halbzeug oder Fertigteil herstellen. Ihre charakteristischen Merkmale sind die rotationssymmetrische runde Gestalt und die innere Hohlrohrform. Grundsätzlich können aber auch anders gestaltete kompakte und

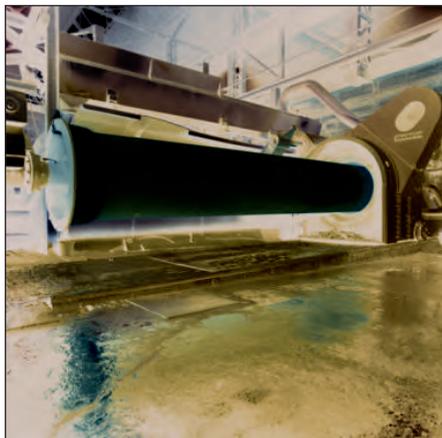


Bild 47: Herausziehen eines Gussrohres aus einer Schleudergießmaschine (Bild: FACHGEMEINSCHAFT GUSS-ROHRSYSTEME, Berlin, Farbfilteraufnahme)

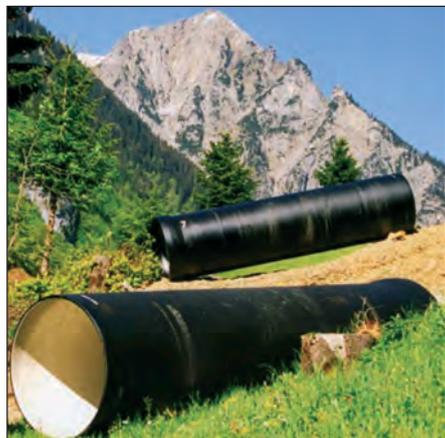


Bild 48: Gusseiserne Rohre der Größe DN 1200, die innen Keramik beschichtet und außen mit Korrosionsschutz versiegelt im Hochgebirge zum Einsatz kommen (Bild: ZGV, Düsseldorf)



Bild 49: Zylinderlaufbuchsen aus austenitischem Gusseisen mit Kugelgraphit (Bild: ZGV, Düsseldorf)

hohl ausgeführte Teile, wenn diese beispielsweise ein dichtes und porenfreies Gefüge haben sollen, geschleudert werden. Es handelt sich beim Schleudergießen verfahrensbedingt und wegen der erforderlichen Kokille um ein Serien- und Großserienverfahren für die Herstellung von Gussteilen bis zu mehreren Tonnen Gewicht. Nur gelegentlich werden Einzelstücke und Kleinserien gefertigt, wie bei der Spezialanwendung Walzenfertigung, wo auch weitaus größere Stückgewichte möglich sind. Ein Hauptanwendungsgebiet im Gusseisenbereich sind Druck- und Abflussrohre aus Gusseisen, die starken Belastungen ausgesetzt sind oder unter extremen Bedingungen wie im alpinen Bereich eingesetzt werden [41] (**Bild 48**), die im Innenbereich von Gebäuden zudem gegenüber den Kunststoffrohren nicht nur robuster und zerstörungssicherer sind, sondern es konnte in Brandversuchen nachgewiesen werden, dass Brände sich nicht wie bei den Kunststoffrohren über diese Leitungen in die darüber und darunter liegenden Etagen weiter ausbreiten können [42].

Einen großen Anwendungsbereich mit für die Zukunft interessanten Anwendungen hat der Schleuderguss als Verbundgießverfahren besonders bei der Herstellung von Gleitlagern gefunden, die durch geeignete Materialkombinationen mit unterschiedlichen an den Anwendungsfall angepassten Eigenschaften in der Innen- und Außenseite gegossen werden. Ebenso lassen sich kostengünstige Außenmaterialien mit hoch legiertem korrosionsbeständigem Innenmaterial wirtschaft-

lich gießen, was besonders im chemischen Anlagenbau verbreitet Anwendung gefunden hat.

Prinzipiell sind alle genormten Legierungen aus Gusseisen mit Kugelgraphit für das Schleudergießen geeignet, weshalb es keine spezielle Normung gibt. Der Werkstoff kann ausschließlich nach den erforderlichen Einsatzbedingungen ausgewählt werden. Zur Verbesserung von Verschleißschichten an Laufbuchsen wird gern mit erhöhtem Phosphorgehalt gearbeitet (**Bild 49**). Im leistungsstarken Motorenbau kommen die mit Chrom, Nickel, Molybdän und Vanadin legierten austenitischen Sorten zum Einsatz. Im Chemieanlagenbau finden neben den Normsorten überwiegend die hoch legierten austenitischen GJS-Sorten Anwendung.

Ein spezielles Anwendungsgebiet des Schleudergießens ist das Herstellen von Walzen und Walzenringen (**Bild 50**). Hier ist besonders von Vorteil, dass mit einem Kern- und einem Mantelmaterial gearbeitet werden kann. Dadurch kann ein weicher und vor allem zäher Kernwerkstoff mit einer harten und verschleißfesten Arbeitsschicht außen kombiniert werden. Während das Mantelmaterial für die Umformarbeit zuständig ist, nimmt der zähere Kernwerkstoff die Achs- und Umformkräfte beim Walzen auf und gewährleistet einen festen Sitz auf den Achsen [43].

Bei Gusslegierungen mit schlechtem Formfüllungsvermögen können unter Ausnutzung der Zentrifugalkraft auch dünnwandige Gusstücke gegossen werden, die im Schwerkraftguss nicht oder nur schwierig gegossen werden können. Einige hoch legierte Sorten lassen sich schwer bearbeiten, und das aus wirtschaftlichen Gründen erforderliche Gießen mit geringen Bearbeitungszugaben kann mit Hilfe der Zentrifugalkraft realisiert werden.

3.2.3 Stranggießverfahren

Strangguss aus Gusseisen mit Kugelgraphit wird nach dem horizontalen Stranggießverfahren in einem kontinuierlichen Gießprozess hergestellt (**Bild 51**). Die Gusseisenschmelze wird nach dem Abstich aus dem Schmelzofen noch nachbehandelt (Magnesiumbehandlung, Impfen) und anschließend in das Ziehgefäß gegossen. Je nach Strangabmessung und Gießgeschwindigkeit wiederholt sich dieser Vorgang alle 15 bis 30 Minuten.

Während der ersten Abkühlungsphase des Gusseisens in der Durchlaufkokille – der Primärkühlung – bildet sich die äußere stützende, feste Randschicht des Strangs. Es schließt sich die Sekundärkühlung an, in der die Stränge an ruhen-



Bild 50: Schleudergießanlage für Walzenguss (Bild: Walzengießerei Coswig)

der Luft abkühlen. Nach Austritt des Strangs aus der Durchlaufkokille ist die Erstarrung über dem ganzen Querschnitt noch nicht abgeschlossen. Im Kern ist der Strang noch einige Zeit flüssig. Die Stranggusskokille, vorwiegend aus Elektrographit hergestellt, erfüllt die Aufgabe der Formgebung und stellt infolge ihrer physikalischen Eigenschaften und der Kühlintensität die Abkühlungsgeschwindigkeit des Strangs auf ein gewünschtes Maß ein. Die Wasserkühlung der Durchlaufkokille ist regelbar. Damit kann



Bild 51: Stranggussanlage mit zwei kontinuierlichen Strängen für Viereck- (links) und Rundprofil (rechts) (Bild: Gontermann-Peipers, Siegen)



Bild 52: In Stranggusslagern wird von den Gießereien eine Vielzahl verschiedener Profile vorgehalten (Bild: Gontermann-Peipers, Siegen)



Bild 53: Diverse aus Stranggusshalbzeug gefertigte Bauteile (Bild: ACO Guss, Kaiserslautern)

die Kühlintensität variiert werden. Durch die Schmierwirkung des Graphits wird die Reibung zwischen Stranggusskokille und Strang vermindert. Die ferrostatische Höhe der Schmelze im Ziehofen übt auf den Strang die Wirkung eines Speisers aus. Die Flüssig- und Erstarrungskontraktion des Werkstoffs wird durch das ständige Nachfließen der Schmelze ausgeglichen. Gleichzeitig wirkt die durch die Graphitausscheidung während der Erstarrung auftretende Expansion einer Lunkerbildung entgegen. Dadurch entsteht beim Strangguss ein lunker- und porenfreies, besonders dichtes und homogenes Gefüge. Das gegossene Halbzeug hat deshalb eine sehr hohe Druckdichtheit gegenüber Flüssigkeiten und Gasen.

Dem Treibaggregat sind Einrichtungen zum Zerteilen des Strangs in einzelne Strangabschnitte nachgeschaltet. Der sich bewegende Strang wird mit einer Trenneinrichtung (Säge oder Brennschneidvorrichtung), die sich parallel zum Strang bewegt, teilweise durchtrennt. Der entstehende Strangabschnitt wird anschließend mit einer Abdrückeinrichtung abgebrochen. Durch Lagerhaltung der Stranggussabschnitte in den Gießereien (**Bild 52**) kann bei Bestellungen kurzfristig an die Kunden geliefert werden. Der Strangquerschnitt ist vorwiegend kreisförmig, quadratisch oder rechteckig. Es entstehen so Rund-, Quadrat- und Rechteckstangen, die in verschiedenen Abmessungen und Längen angeboten werden. Die Stranggussabschnitte werden entweder unbearbeitet oder spangebend vorbearbeitet geliefert.

Die Gießerei liefert meistens den Strangabschnitt in den vom Kunden geforderten Abmessungen und mit bestimmten mechanischen Eigenschaften an den Be-

steller, der die Teilefertigung durch spanendes Bearbeiten vornimmt. Möglich sind aber auch eine weitere Verbesserung der Werkstoffeigenschaften und der Gebrauchseigenschaften des Bauteils durch Wärmebehandeln, spanende Vorbearbeitung und Beschichtung. Die Stranggussabschnitte (auch Strangguss-Stangen genannt) bestimmter Länge werden traditionell entweder unbearbeitet oder geschält vom Hersteller ausgeliefert. Auch eine spanende allseitige Bearbeitung auf Fertigmaße nach Kundenwünschen wird von den Herstellern angeboten. Dadurch lassen sich zusätzliche Arbeitsgänge beim Kunden vermeiden.

Bei Quadrat- und Rechteckstangen erfolgt eine 6-Seiten-Bearbeitung. Ausgeführt werden dabei Winkelgenauigkeiten von $< 0,05$ mm auf 100 mm, gleiche Werte für die Planparallelität und Längentoleranzen von $< 0,04$ mm auf 100 mm. Auch Haltebohrungen oder genaue Vorzentrierungen der Bohrpositionen sind lieferbar. Rundstangen können genau auf ein gewünschtes Maß spanend bearbeitet werden.

Die mechanischen Eigenschaften von Strangguss aus Gusseisen mit Kugelgraphit sind noch nicht genormt. Geliefert werden folgende Sorten des Gusseisens mit Kugelgraphit: GJS-400-15C (ferritisch gegläht), GJS-400-7C (ferritisch-perlitisch), GJS-500-7C (perlitisch-ferritisch) und GJS-600-3C (vorwiegend perlitisch). Die mechanischen Eigenschaften (Zugfestigkeit, Dehngrenze, Bruchdehnung) sind von der maßgebenden Wanddicke abhängig. Beim Strangguss von Gusseisen mit Kugelgraphit wird nicht mit getrennt gegossenen Probestücken für die Ermittlung der mechanischen Eigenschaften gearbeitet. Diesbezügliche Probestücke werden aus den Strängen entnommen (Bezeichnung „C“) [34].

Strangguss aus Gusseisen mit Kugelgraphit (GJS) kann entweder nach der kennzeichnenden Eigenschaft Zugfestigkeit oder nach der kennzeichnenden Eigenschaft Härte (Brinellhärte) bestellt werden. Die metallische Grundmasse kann ferritisch, ferritisch-perlitisch und perlitisch eingestellt werden. Die vier angebotenen GJS-Sorten (GJS-400-15C, GJS-400-7C, GJS-500-7C, GJS-600-3C) liegen im Zugfestigkeitsbereich von 370 bis 600 N/mm². Diese Werte haben aber derzeit noch keinen verbindlichen Charakter, denn für Gusseisen-Strangguss gibt es gegenwärtig keine nationale Norm, keine Europäische Norm (EN) und keine internationale Norm (ISO). Die mechanischen Eigenschaften von Gusseisen-Strangguss werden deshalb von den liefernden Gießereien angeboten. Die Zugfestigkeit, Dehngrenze, Bruchdehnung und Härte sind zudem vom Strangdurchmesser beziehungsweise der maßgebenden Wanddicke abhängig. Diese Wanddickenabhängigkeit der mechanischen Eigenschaften ist beim Gusseisen mit Kugelgraphit nicht so ausgeprägt wie bei den anderen Gusseisenwerkstoffen.

Gusseisen-Strangguss ist im Gegensatz zum Gusseisen-Formguss, bei dem der Verwendungszweck durch die Herstellung von endabmessungsnahen gegossenen Bauteilen eindeutig feststeht, ein gegossenes Halbzeug für die vielfältigsten Anwendungen (**Bild 53**). Gusseisen-Strangguss lässt sich deshalb außerordentlich vielseitig einsetzen. Aus ihm können sehr unterschiedliche Bauteile für alle Industriezweige gefertigt werden.

Weiterführende Informationen zum Thema Gusseisen-Strangguss enthält eine Veröffentlichung der Zentrale für Gussverwendung-ZGV in Düsseldorf [34].

4 Metallurgie

4.1 Grundsätzliches

Unter 1.1 wurde bereits ausführlich über die Entdeckung und Weiterentwicklung von Gusseisen mit Kugelgraphit berichtet [1 - 3]. Man hatte Mitte des 20. Jhs. mit der Magnesiumbehandlung ein serien-taugliches Verfahren zur kugelförmigen Ausbildung des Graphits im Gusseisen entwickelt. Magnesium und Cer waren die entscheidenden Hilfsmittel, denn beide entschwefeln und desoxidieren zugleich und führen zur Kugelbildung. Wie die Kugeln aber wirklich entstehen, wusste damals mit Ausnahme der Aachener Gießler keiner so richtig (**Bild 54**). Die Frage dürfte heute zu etwa 70 % geklärt sein, die „letzten Geheimnisse“ spielen also noch immer eine Rolle. Auch der Streit darüber, welche Form des Graphits – die Lamelle oder die Kugel – die „natürliche“ wäre, ist noch nicht vom Tisch, obwohl die Tatsache, dass die Lamellenbildung reversibel ist und die Kugelbildung nicht, die Fronten hätte bereinigen sollen. Wie dem aber auch sei, Gusseisen mit Kugelgraphit floriert, ist aber durchaus noch entwicklungs-fähig, was alle Beteiligten, Hersteller wie Abnehmer, freuen sollte (**Bild 55**).

4.2 Chemische Zusammen- setzung

Eine Vielzahl von metallurgischen und kristallographischen Einflüssen ist an der Graphitkugelbildung beteiligt, die zu unterschiedlichen Ausbildungsformen führen. Für das Schmelzen ergibt sich daraus die Forderung nach einwandfreien Rohstoffen vorzugsweise für den Einsatz in einem Induktionstiegelofen. Als Einsatzstoffe für das Erschmelzen des Basis-eisens werden Roheisen, Stahlschrott und arteigenes Kreislaufmaterial verwendet. Das Verhältnis Roheisen/Stahl variiert etwa zwischen 0,5 und 2. Häufig werden auch Legierungselemente zugesetzt, sei es zur Einstellung des gewünschten Perlitanteils im Gefüge des Gusszustands oder bei der Herstellung von legierten Sorten.

Angaben zur chemischen Analyse von Gusseisen mit Kugelgraphit nach **DIN EN 1563** und **DIN EN 1564** berühren ein sehr komplexes Gebiet. In den Gießereien werden für eine Analyse bis zu 30 chemische Elemente analysiert und bewertet. Für allgemeine unverbindliche Orientierung sei als ein Beispiel für eine chemische Analyse für Gusseisen mit Kugelgraphit folgende Zusammensetzung genannt: 3,67 % C; 2,4 % Si; 0,42 % Mn; 0,03 % P; 0,02 % S und 0,041 % Mg. Über die Bedeutung dieser Elemente und über den Einfluss von Legierungs- und Spurenelementen auf die Eigenschaften von Gusseisen mit Kugelgraphit wird umfassend in [46] berichtet.

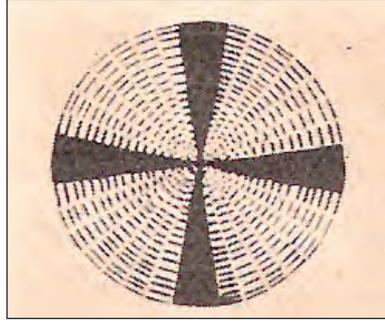


Bild 54: Zeichnung einer Graphitkugel unter polarisiertem Licht von C. Afday aus dem Jahre 1937

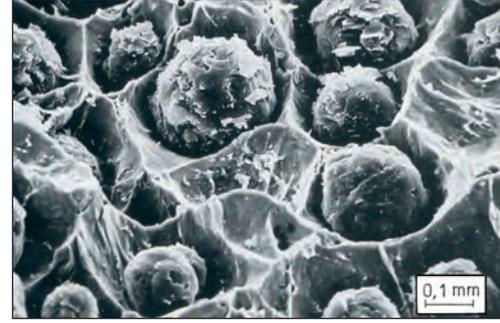


Bild 55: Bruchfläche von Gusseisen mit Kugelgraphit nach der Schlagprüfung bei -20 °C (Gut sichtbar ist die kugelförmige Ausbildung des Graphits. Die Wabenstruktur ist ein charakteristisches Merkmal für einen zähen Werkstoff.)

Eine Gießerei liefert Gussteile aus Gusseisen mit Kugelgraphit nach den oben genannten Normen nach Festlegung der mechanischen Eigenschaften. Dazu gehören die Zugfestigkeit, die 0,2 %-Dehngrenze, die Bruchdehnung, in speziellen Fällen die Kerbschlagarbeit sowie Angaben zur Brinellhärte. Die genannten Normen legen fest: „Das Verfahren zur Herstellung von Gusseisen mit Kugelgraphit sowie dessen chemische Zusammensetzung und jede Wärmebehandlung sind, sofern der Käufer nichts festgelegt hat, dem Ermessen des Herstellers überlassen.“

Für die chemischen Elemente, die im Gusseisen mit Kugelgraphit vorhanden sind, kann folgende Einteilung gewählt werden:

- Graphitisierend wirkende Elemente: Sie fördern die Erstarrung nach dem stabilen Fe-C-Diagramm mit Bildung von Graphitkristallen.
- Carbidstabilisierende Elemente: Diese Elemente führen wie zum Beispiel. Chrom (Cr) zu einer Erstarrung nach dem metastabilen Fe-C-Diagramm ohne Graphitkristalle.
- Störelemente: Diese Elemente stören die Bildung von Kugelgraphit.

Das wichtigste graphitisierend wirkende Element ist das Silicium (Si). Die Werkstoffsorten des Gusseisens mit Kugelgraphit sind deshalb Fe-C-Si-Legierungen.

Carbidstabilisierende Elemente dürfen bestimmte Gehalte nicht übersteigen, weil sonst bei der Erstarrung oder bei der Gefügeumwandlung im festen Zustand unerwünschte Effekte auftreten können.

Bei der Erstarrung besteht bei zu hohen Gehalten an Carbid stabilisierenden Elementen die Gefahr, dass im ganzen Gussteil oder in bestimmten Bereichen von ihm sich keine Graphitkristalle bilden, sondern ein graphitfreies Mikrogefüge, das als weißes Gusseisen bezeichnet wird. Dadurch kann ein Gussteil völlig unbrauchbar werden oder muss, wenn der Anteil an weißem Gefüge relativ klein ist, wärmebehandelt werden. Das erhöht die Produktionskosten.

Bei der Umwandlung des Austenits bei der Abkühlung im festen Zustand wird die Einstellung eines hochwertigen ferritischen Gefüges durch Carbid stabilisierende Elemente beeinträchtigt. Eine Wärmebehandlung kann hier hilfreich sein, beeinträchtigt aber die Wirtschaftlichkeit. Unerlässlich ist die Berücksichtigung der Perlit stabilisierenden Wirkung von Elementen auf das Grundgefüge im Gusszustand. Dieser Einfluss wurde durch die Perlitwertzahl P_x ausgedrückt [47].

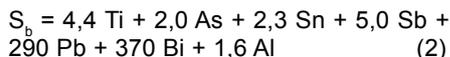
$$P_x = 3,0 \text{ Mn} - 2,65 (\text{Si} - 2,0) + 7,75 \text{ Cu} + 9,0 \text{ Sn} + 375 \text{ Pb} + 333 \text{ Bi} + 20,1 \text{ As} + 9,6 \text{ Cr} + 71,7 \text{ Sb} \quad (1)$$

Aus der Beziehung $F = 961 e^{-P_x}$ (in %) lässt sich der Ferritanteil in Prozent ermitteln.

Andererseits wirken Carbid stabilisierende Elemente sich günstig auf die Einstellung eines perlitischen Grundgefüges aus, oder sie führen zu günstigen speziellen Eigenschaften wie z.B. ein Zusatz von Molybdän (Mo) bei den SiMo-Werkstoffen.

Es gibt chemische Elemente, die speziell die Kugelgraphitbildung bei der Erstarrung stören, die sogenannten Störelemente [47, 48]. Dazu gehören z.B. Blei (Pb), Wismut (Bi), Antimon (Sb), Arsen (As), Titan (Ti), Zinn (Sn) und Aluminium (Al). Übersteigen die Gehalte solcher Störelemente kritische Gehalte, wie zum Beispiel 0,004 % Wismut, so bilden sich bei der Erstarrung keine Graphitkugeln mehr, sondern sehr ungünstige Graphitformen. Es entsteht kein Gusseisen mit Kugelgraphit mehr. Die kritischen Gehalte der Störelemente sind meist sehr klein. Sie liegen im Bereich von einigen Tausendstel bis Hundertstel Prozent. Diese Störwirkung ist auch abhängig von der Gussteilwanddicke. Diese Störelemente wirken um so schärfer, je größer die Gussteilwanddicke ist. Für die komplexe Wirkung technischer Störelemente wurde eine Spurenbewertungszahl S_b ermittelt [47]. In die nachstehend angeführte Gleichung werden für die einzelnen Elemente die tatsächlich vorliegenden Gehalte ein-

gesetzt: Je höher die Zahl vor einem Störelement ist, um so kleiner ist der kritische Gehalt. Für die Brauchbarkeit eines metallischen Einsatzstoffs muss die Spurenbewertungszahl < 1 sein.



Die genannte Störwirkung kann durch Zusatz von Seltenen Erdmetallen wie zum Beispiel Cer (Ce) in gewissen Grenzen neutralisiert werden, was jedoch die Produktionskosten erhöht. Die kritischen Gehalte der Störelemente sind von ihrem Atomvolumen abhängig. Je größer das Atomvolumen ist, um so kleiner ist der kritische Gehalt eines Störelements[48].

Bei der Wahl der richtigen chemischen Analyse für Gusseisen mit Kugelgraphit spielt auch die Größe des Gussteils (seine Wanddicke) und die Art des Gießverfahrens eine bedeutende Rolle.

Das komplexe System für eine gussteilbezogene optimale chemische Analyse für Gusseisen mit Kugelgraphit wird von den Fachleuten in den Gießereien voll beherrscht. Die Kunden einer Gießerei erhalten hochwertige Gussteile mit den von ihnen bestellten und von der Gießerei nach den gültigen **DIN EN 1563** und **DIN EN 1564** festgelegten mechanischen Eigenschaften. Um die chemische Zusammensetzung des Gusseisens mit Kugelgraphit brauchen sie sich gar nicht zu kümmern. Das schließt nicht aus, dass in wenigen Sonderfällen von den Kunden spezielle Wünsche für die chemische Zusammensetzung an die Gießereien herangetragen werden können. Das ist dann in Absprache mit einer Gießerei in den Lieferverträgen unter Beachtung der allgemeinen und speziellen Lieferbedingungen **DIN EN 1559-1** und **DIN EN 1559-3** festzulegen.

Ein besonderer Wert muss auf die Auswahl des Roheisens und geeigneter Stahlschrottsorten gelegt werden. Bedingung sind niedrige Gehalte an Phosphor und Schwefel sowie solchen Begleitelementen, die einen ungünstigen Einfluss auf die Kugelgraphitbildung und die Ausbildung der metallischen Grundmasse haben, wie zum Beispiel Blei, Antimon, Wismut, Bor, Arsen und Titan.

Als Stahlschrott darf auf keinen Fall der „Sammelschrott“ eingesetzt werden, der stets von unhomogener Zusammensetzung ist. Empfehlenswert dagegen ist so genannter Entfallstellenschrott, das heißt, Abfälle aus der Stahl herstellenden oder verarbeitenden Industrie. Die genaue Kenntnis der Entfallstelle sichert ein Einsatzmaterial von gleicher chemischer Zusammensetzung - Knüppelenden, Grobblechabschnitte, Flanschschrott, Tiefziehblech. Das Beschaffen von geeignetem

Schrott ist jedoch im Zuge der Globalisierung der Wirtschaft zunehmend schwieriger geworden.

Unerwünschte Spurenelemente können sowohl durch Roheisen als auch durch Stahlschrott eingeschleppt werden. Beim Roheisen handelt es sich um charakterisierende Gruppierungen (Fingerabdrücke), die Unterschiede sind aber weit geringer als beim Stahlschrott, der in der Regel die Hauptmenge an Spurenelementen einbringt [44].

Die Qualität des Stahlschrotts nimmt aus der Sicht des Gießers mit steigender Tendenz ab. Unmittelbare Ursachen dafür sind der steigende Anteil an legiertem und vor allem mikrolegiertem Stahl an der Gesamtproduktion und steigende Mengen an Nichteisen-Bestandteilen. Eine in den achtziger Jahren vom U. S. Bureau of Mines auf Grundlage von Untersuchungen des Batelle-Instituts und der Ohio State University veröffentlichte Studie [45] weist für die Zukunft auf die Konsequenzen hin, die sich aus der Verwendung von Stahlschrott ergeben. Innerhalb der letzten zwanzig Jahre hat sich diese Vorhersage mehr als erfüllt.

Weitere wichtige Einsatzstoffe zum Einstellen der gewünschten chemischen Zusammensetzung sind Aufkohlungsmittel (schwefelarme Elektrodenkohle, Petrolkoks, Koksluger), Aufsilicierungsmittel (Ferosilicium, Siliciumcarbid), Ferromangan sowie - zum Einstellen besonderer Eigenschaften - beispielsweise Kupfer, Zinn, Nickel und Ferromolybdän. Auch für diese Stoffe gilt die Forderung nach Reinheit und Gleichmäßigkeit der chemischen und physikalischen Eigenschaften. Die sorgfältige Auswahl der Einsatzstoffe und das exakte Einhalten der Zusammensetzung sind letztlich maßgebend für die äußere und innere Beschaffenheit der Gussstücke. Sie beeinflussen nicht nur die Art des Erstarrens, sondern führen über die gezielte Ausbildung des Grundgefüges zu reproduzierbaren Werkstoff- und Werkstückeigenschaften.

Beim Herstellen im Gusszustand muss die chemische Zusammensetzung - unter Berücksichtigung der Abkühlgeschwindigkeit in der Gießform beziehungsweise der Wanddicken des Gussstücks - so eingestellt werden, dass je nach Erfordernis ein ferritisches, ein rein perlitisches oder ein perlitisch/ferritisches Gefüge entsteht. Bei den verschiedenen Werkstoffsorten, die über eine Wärmebehandlung eingestellt werden können, wird üblicherweise von einer Einheitszusammensetzung ausgegangen. Es können größere Analysenstreuungen als beim Herstellen im Gusszustand toleriert werden, denn das Gefüge und damit die Werkstoffsorte werden ausschließlich von der Art der Wärmebehandlung bestimmt.

4.3 Schmelzen

Je nach Produktionsprogramm und den betrieblichen Gegebenheiten wird das Basiseisen für die Herstellung von Gusseisen mit Kugelgraphit überwiegend nach diesen Verfahren erschmolzen:

- Schmelzen im Induktionstiegelofen (Simplex-Verfahren): Das Aufschmelzen soll schnell erfolgen und die Temperatureinstellung richtet sich nach der gewählten Gießtemperatur unter Berücksichtigung der auftretenden Temperaturverluste für das Behandeln und Umfüllen. Eine Überhitzung bis auf die Temperatur der Entkohlungsreaktion ist weder üblich noch angeraten.
- Vorschmelzen im Heißwind-Kupolofen oder Lichtbogenofen, anschließend Umsetzen in einen Induktionstiegelofen zur Korrektur der chemischen Zusammensetzung und Temperatur (Duplex-Verfahren).
- Gegebenenfalls Umfüllen in einen Warmhalteofen.

Im Anschluss an das Erschmelzen des Basiseisens folgen drei entscheidende Schritte, die zum einen erst die kugelige Ausbildung des Graphits beim Erstarren der Schmelze ermöglichen, zum anderen auf das angestrebte Grundgefüge hinwirken:

- Entschwefeln der Schmelze;
- Behandlung mit Magnesium;
- Impfen.

4.3.1 Entschwefeln

Im Hinblick auf eine technisch und wirtschaftlich optimale Magnesiumbehandlung soll der Schwefelgehalt des Basiseisens (deutlich) unter 0,02 % liegen, wenn die Magnesiumzugabe mit Vorlegierungen erfolgt. Wird dagegen mit Reinemagnesium behandelt, dürfte der zwingend bekannte Schwefelgehalt eigentlich auch etwas höher liegen. Aber je größer sein Anteil im Ausgangseisen ist, desto eher verbleiben Reaktionsprodukte wie zum Beispiel MgS als Einschlüsse im Gussstück. Darum wird diese Vorgehensweise nicht empfohlen.

Zunehmend beliebt ist das Vorgehen in zwei getrennten Phasen. Zuerst wird mit Magnesium entschwefelt und danach erst behandelt, wobei zwischen diesen Vorgängen eine Speicherphase zwischengeschaltet werden kann. Die Behandlung erfolgt dann wirtschaftlich von einem niedrigen Schwefelniveau aus nach jedem beliebigen Verfahren.

Überwiegend werden zum Entschwefeln jedoch Mittel auf Grundlage von Calciumcarbid CaC_2 verwendet, die derart modifiziert sind, dass CaC_2 möglichst vollständig ausreagiert. Der Vorgang findet in Ge-

fäßen außerhalb des Schmelzaggregats statt, wobei durch mechanisches Rühren das Mittel und die Schmelze stets in Kontakt bleiben, beispielsweise in sogenannten Schüttelpfannen, mit Hilfe von Balkenrührgeräten oder durch Einblasen in die Schmelze.

Bewährt hat sich auch das kontinuierliche Entschwefeln unter Zugabe des Calciumcarbids in den Siphon des Kupolofens. Gelegentlich wird auch im Induktionstiegelofen direkt entschwefelt.

4.3.2 Behandlung mit Magnesium

Beim Herstellen von Gusseisen mit Kugelgraphit auf automatischen Gießanlagen mit Gießstrahlimpfung ergaben Untersuchungen [49], dass eine ausreichende Kugelgraphitbildung bei Rest-Mg-Gehalten unterhalb 0,04 % erzielt wird, wenn der Schwefelgehalt sehr niedrig ist. Wenn das Magnesiumsulfid nach dem Behandeln ausreichend Zeit zum Abscheiden hat, weist die im Gießofen vorliegende Schlacke bis zu 30 % Schwefel auf, während in der Schmelze davon nur 0,001 % oder noch weniger vorliegen. Daraus ist die enorme Entschwefelungskraft des Magnesiums ersichtlich.

Gusseisen mit Kugelgraphit wird industriell heute ausschließlich unter Zuhilfenahme von Magnesium (mit oder ohne Zusatz von Cer) hergestellt. Jeder ist dabei bestrebt, mit so wenig Magnesium wie möglich auszukommen, nicht nur um

Kosten zu sparen, sondern vor allem wegen der äußerst nachteiligen Einflüsse von überschüssigem Magnesium auf die Qualität der Gussteile (Bildung von Schlacken („Dross“) während des Gießens und von Eisencarbid in den zuletzt erstarrenden Stückbereichen). Wie viel Magnesium nun wirklich benötigt wird, hängt in erster Linie vom Ausgangsgehalt des Eisens an Schwefel ab, weil der Vorgang des Abbindens von Schwefel nicht schon kurz nach dem Zusatz von Magnesium abgeschlossen ist, sondern sich unter Einschlussbildung bis zu den letzten Phasen der Erstarrung des Eisens hin fortsetzt [49]. Zum Erhalten von 100 % Kugelgraphit wird in jedem Fall ein Magnesiumgehalt gefordert, der den Wert $3 \cdot \% S$ überschreitet, zum Beispiel um 0,025 %. Daraus ergibt sich bei 0,001 % S ein Gehalt von 0,028 % Rest-Magnesium. Darin ist der Magnesiumbedarf für die Desoxidation (üblicherweise Abbau von rund 30 ppm Sauerstoff) mit 0,0045 % Mg bereits berücksichtigt. Will man mit weniger als 0,02 % Rest-Mg auskommen, muss der Ausgangsgehalt an Schwefel unter 0,001 % liegen und die Desoxidation muss separat mit Aluminium und/oder Cer erfolgen. Dies ist jedoch im praktischen Betrieb kaum zu realisieren.

Wegen seiner geringen Dichte und seines niedrigen Siedepunktes ist das Einbringen von Reinmagnesium in flüssiges Gusseisen nicht ohne besondere Vorkehrungen durchzuführen. Das Problem des betriebssicheren Einbringens wurde daher zunächst durch Legieren des Magnesiums mit anderen Metallen gelöst (zum Beispiel Nickel oder Kupfer oder Ferrosilicium). Das Überführen des Magnesiums in metallische Verbindungen hat gleichzeitig seine Verdünnung zur Folge, wodurch der Dampfdruck beträchtlich erniedrigt wird. Demzufolge haben diese Legierungen (auch Vorlegierungen genannt) einen um so kleineren Dampfdruck, je geringer ihr Magnesiumgehalt ist. Diese Erfahrung hat 1949 bereits C. K. Donoho [3] gemacht, dessen erste Versuche mit einer 90%igen Magnesiumlegierung (Flugzeugschrott) angesichts der gleißenden Lichtentwicklung und des Metallauswurfs aus der vermutlich offenen Pfanne ziemlich dramatisch verlaufen sein mussten. Danach wurden Ni-Mg- und Cu-Mg-Vorlegierungen mit Magnesium gehalten bis hinunter auf 18 % Mg mit einem von 0 bis auf 20 % gestiegenen Ausbringen entwickelt [50].

Vorlegierungen mit 3 bis 15 % Magnesium werden vorwiegend nach dem Übergießverfahren oder nach dem „Sandwich“-Verfahren in die Schmelze eingebracht. Sie werden am Boden beziehungsweise in einer seitlichen Vertiefung der Pfanne angeordnet und mit Blechabfällen, Gusseisenpänen oder Ferrosilicium abgedeckt, um die starke Reaktion mit

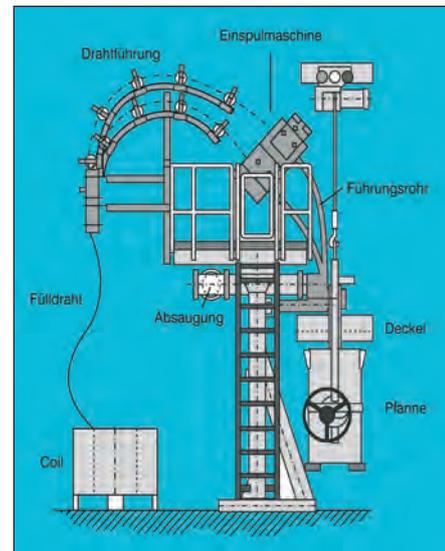


Bild 57: Behandlungsstation für das Draht-einspulpverfahren

dem ersten in die Pfanne einlaufenden Eisen abzumildern. Vorlegierungen mit höheren Magnesiumgehalten (bis 35 %) sowie mit Magnesium getränkter Koks beziehungsweise Eisenschwamm werden mit Tauchglocken in die bereits gefüllte Behandlungspfanne eingebracht. Behandlungsmittel mit hoher Dichte, zum Beispiel Ni-Mg, werden entweder auf die Badoberfläche aufgeworfen, auf dem Pfannenboden überschüttet oder auch getaucht. Weil Nickel als karzinogen gilt, kommen diese Legierungen großtechnisch allerdings nicht mehr zur Anwendung.

Steigender Beliebtheit erfreut sich nach überwundenen Hardwareproblemen das Draht-Einspulpverfahren. Der Draht wird mit einer FeSiMg-Vorlegierung (etwa 12 % Mg und 4 % Cer-Mischmetall) gefüllt und meterweise in eine Behandlungspfanne oder auch in einen Gießofen zur eventuell erforderlichen Aufrischung eingespult. In dieser Flexibilität liegt letztlich auch der Vorteil der Methode.

Beim so genannten Inmold-Verfahren für die Serienfertigung wird eine Vorlegierung mit niedrigem Magnesiumgehalt in eine in der Gießform angeordnete Reaktionskammer eingebracht. Das gesamte in die Form einlaufende Eisen, das besonders gut entschwefelt sein muss, kommt mit der Vorlegierung zur Reaktion. Kammergröße, Gießgeschwindigkeit und Auflösungsverhalten der Vorlegierung sollten sorgfältig aufeinander abgestimmt sein.

Reinmagnesium muss unter Zwang in geschlossenen Behandlungsgefäßen in die Schmelze eingebracht werden. Hier hat sich vor allem das Konverterverfahren durchgesetzt. Der „Urkonverter“ stand, wie könnte es anders sein, im Aachener Gießereinstitut. Stellvertretend für die Vielzahl der Behandlungsmethoden sind in den **Bildern 56** und **57** das Konverterverfahren und das Drahteinspulpverfahren gezeigt.

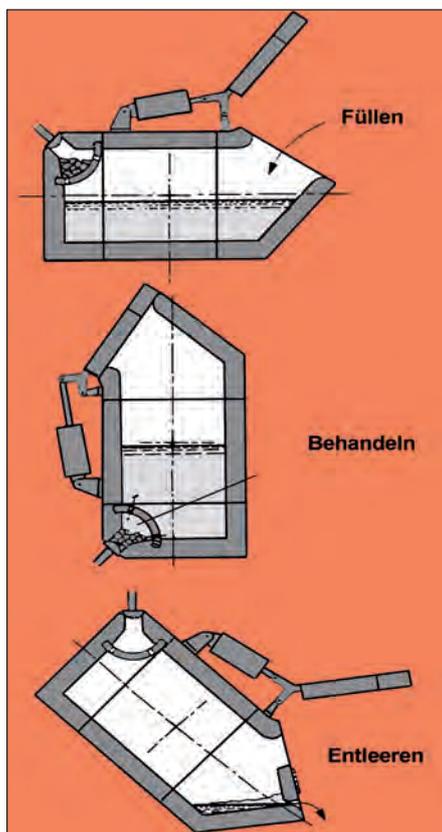


Bild 56: Konverterverfahren zur Behandlung des Basiseisens mit Magnesium

4.3.3 Impfen

Nach der Behandlung mit Magnesium und möglichst unmittelbar vor dem Gießen der Schmelze in die Gießform muss (ausgenommen beim Inmold-Verfahren) die Kristallisation des Graphits durch Einbringen von Keimen angeregt werden. Dieser Vorgang wird „Impfen“ genannt. Hochwissenschaftlich spricht man auch von der „heterogenen Keimbildungskatalyse“. Es handelt sich um die Zugabe von meist feinkörnigen Impfmitteln auf Ferrosilicium-Basis. Diese werden entweder in die Gießpfanne eingemischt oder in den Gießstrahl eingebracht. Häufig wird als zusätzliches oder auch als alleiniges Verfahren ein Impfen in der Form durchgeführt, bei der Ferrosilicium-Formlinge ähnlich wie beim Inmold-Verfahren in die Form eingelegt werden.

Durch das Impfen wird in der Schmelze ein günstiger Keimzustand eingestellt. Dieser bewirkt eine gezielte Graphitabscheidung (Anzahl und Größe der Sphärolithen) und schließlich das Einstellen des gewünschten Grundgefüges. Gute Impfmittel bleiben in der Schmelze lange wirksam und sind auf die Erstarrungszeit des jeweiligen Gussstücks abgestimmt. Zur Förderung der Keimbildung enthalten sie dosierte Zusätze von Calcium, Aluminium, Barium, Zirkonium, Strontium, Selten-erdmetalle Erden und anderen Elementen, die entweder einzeln oder kombiniert der Schmelze zugesetzt werden. Die Zugabemenge des Impfmittels richtet sich nach dessen Wirksamkeit und liegt im Bereich von 0,1 bis 0,5-Masse-%.

Seit Beginn des neuen Jahrtausends gilt es als erwiesen, dass die Kristallkeime für Kugelgraphit aus zwei Komponenten bestehen [51]. Grundkeim ist ein Reaktionsprodukt von Magnesium mit Sauerstoff und Silicium, ein Silicat namens Enstantit. Dieser verfügt über ein Kristallgitter, das mit demjenigen des Graphits recht wenig Ähnlichkeit besitzt und von ihm als äußerst unattraktiv empfunden wird. Der Trick besteht nun darin, dass auf diese Enstantit-Teilchen Verbindungen der Elemente Aluminium, Strontium, Barium usw. kondensieren, die über die gewünschte Attraktivität allerdings verfügen. Ende 2005 wurde an der RWTH oder FH Aachen wohl erstmalig ein Enstantit-Teilchen im Zentrum einer Graphitkugel nachgewiesen und Mitte 2006 wurde am IfG, Düsseldorf, im Auftrag eines Kunden nach dem gleichen Prinzip eine Methode entwickelt, wonach auch keimwirksame Graphitschichten auf solchen Teilchen „transportiert“ werden [52].

4.4 Überwachungsmethoden

Die Herstellung von Gusseisen mit Kugelgraphit wird im Verlauf des gesamten Prozesses überwacht (**Bild 58**). Dies betrifft sowohl die chemische Zusammensetzung als auch Gefügeausbildung und die mechanischen Eigenschaften. Folgende In-Process-Prüfungen kommen dabei zur Anwendung:

- Für die Überwachung der chemischen Zusammensetzung kommt die spektrometrische Bestimmung der Begleit-, Legierungs- und Spurenelemente im Basiseisen vor der Behandlung zum Einsatz. In kleineren Gießereien ist der Spektrometer in der Regel in unmittelbarer Umgebung des

Schmelzbetriebs angeordnet. Ist dies nicht der Fall, werden vor Ort zumindest die Gehalte an Kohlenstoff und Silicium thermoanalytisch bestimmt. Hierbei werden Erstarrungskurven auf Merkmale untersucht, die mit den Gehalten beider Elemente korrelieren. Dieser etwa 5 Minuten dauernde Vorgang soll demnächst auf Grundlage von Untersuchungen des IfG auf 60 s verkürzt werden. Größere Gießereien, die sich bisher meist eines Zentrallabors bedienen, gehen zunehmend zur Installation von Analysenautomaten vor Ort über.

- Für die Bestimmung des Gefüges werden unmittelbar nach der Behandlung mit Magnesium aus jeder behan-

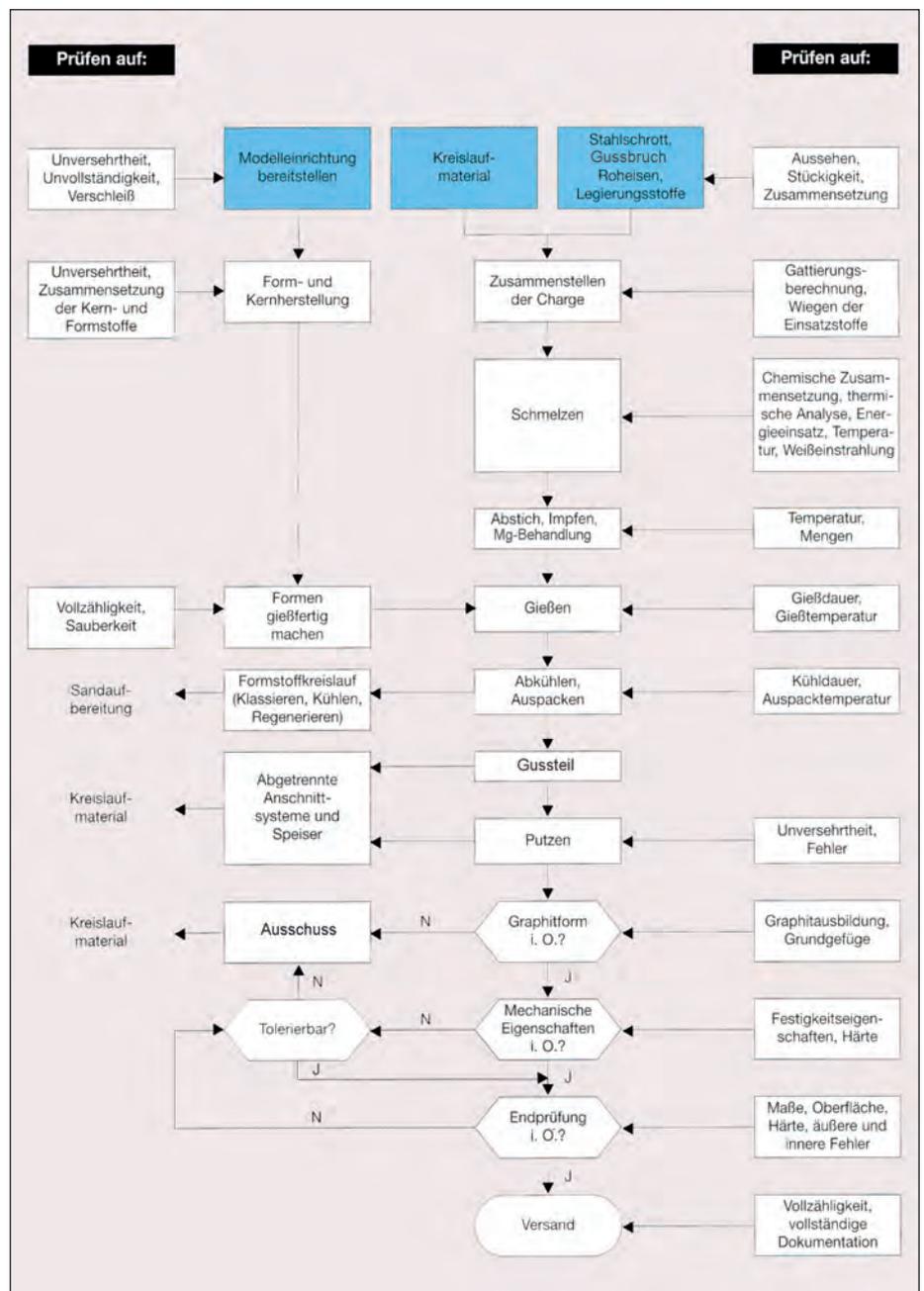


Bild 58: Fertigungsablauf und durchgeführte Prüfungen bei der Herstellung von Gussteilen aus Gusseisen mit Kugelgraphit

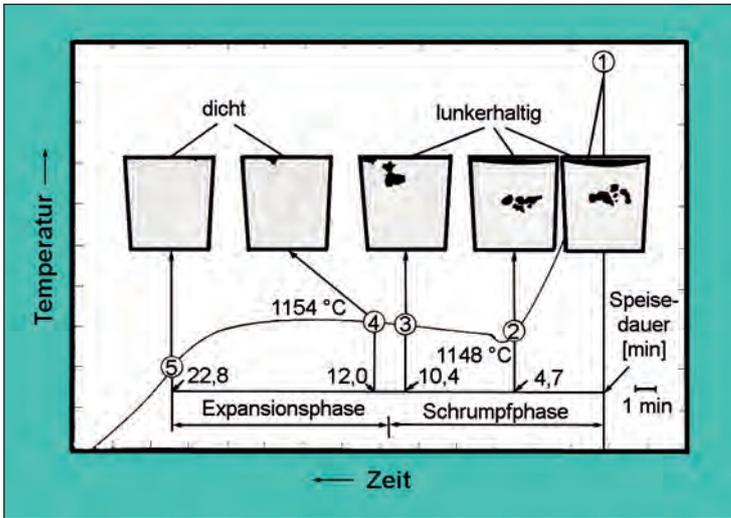


Bild 59: Zusammenfassende Ergebnisdarstellung einer kombinierten Messung von Lunkerbildung und Eigenspeisung (nach [13])



Bild 61: Abgießen einer Form, links im Bild der Induktionsfenschmelzbetrieb mit zwei Schmelzöfen (Bild: Eisen-gießerei H. Dhonau, Triberg)

delten Pfanne besondere Proben entnommen, die es je nach Größe und Form gestatten, innerhalb von 120 Sekunden (das heißt in der Regel noch

vor dem Gießen!) einen metallographischen Schliff zur Überprüfung der Graphitform nach **ISO 945** anzufertigen. Für spätere Untersuchungen (Gefü-

ge, mechanische Eigenschaften) werden entweder angegossene Probe-stücke oder getrennt gegossene, der Wanddicke des Gussteils ange-passte Normproben verwendet.

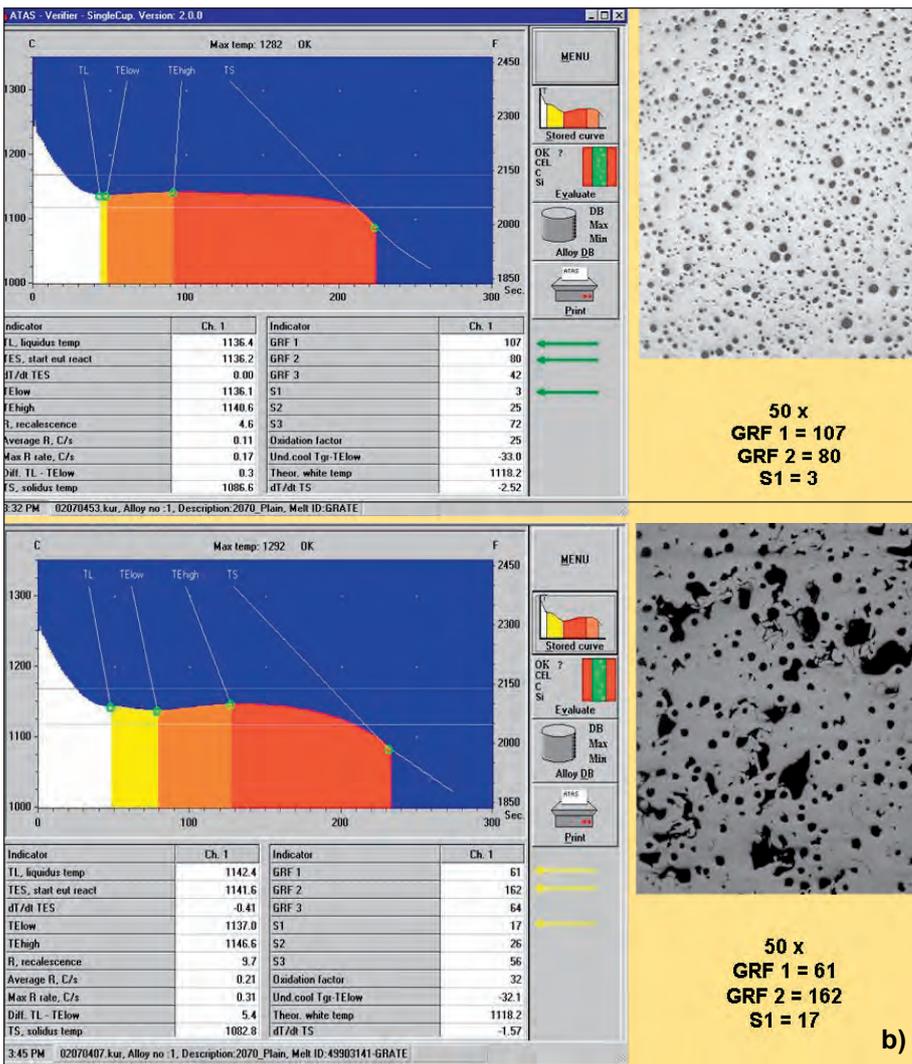


Bild 60: Vorhersage einer einwandfreien (a) und einer sehr mangelhaften Ausbildung (b) des Kugelgraphits durch thermische Analyse

- Während der Schwefelgehalt analytisch leicht und schnell ermittelt werden kann, ist die Sauerstoffbestimmung recht aufwändig. Mit Hilfe von sogenannten EMK-Messsonden ist es möglich, die temperaturabhängige thermodynamische Aktivität des Sauerstoffs zu messen. Sinnvollerweise wird diese Messung thermoanalytisch unterstützt [53]. Eine quantitative Bestimmung ist mit Hilfe der Oxidspektrometrieanalyse zwar möglich, aber zu zeitaufwändig, um bei der Prozessregelung hilfreich zu sein. Inzwischen ist es allerdings gelungen, den aktiven, das heißt an der Keimbildung beteiligten Sauerstoff innerhalb einer sehr kurzen Zeit auch thermoanalytisch zu bestimmen [54]. Die Analyse einer Erstarrungs- und einer dazugehörigen Längenänderungskurve gestattet auch eine sichere Bewertung der Erstarrungsmorphologie und der Lunkerneigung beziehungsweise der zeitlichen Entwicklung des Volumendefizits [55].

Dies wird eindrucksvoll im **Bild 59** gezeigt. Es leuchtet ein, dass eine kombinierte Prüfung die Sicherheit einer Vorhersage enorm steigert. Ist dies aus betrieblichen Gründen nicht möglich, bedient man sich einer aufwändig analysierten Erstarrungskurve. Entsprechende kommerzielle Produkte für diese Aufgaben sind auf dem Markt erhältlich. Im **Bild 60** sind hierzu Beispiele für „gutes“ und „schlechtes“ GJS zu sehen.

5 Wärme- und Oberflächenbehandlung

Wärmebehandeln ist in der Fertigungstechnik nach DIN 8580 die Hauptgruppe 6 „Stoffeigenschaftsändern“. Hierzu gehört eine Gruppe von Fertigungsverfahren, die die Eigenschaften eines Werkstoffes verändern. Das geschieht zumeist durch Veränderungen im submikroskopischen oder interatomaren Bereich, zum Beispiel durch Diffusion von Atomen, Erzeugen und Bewegen von Versetzungen im Atomgitter und durch chemische Reaktionen.

Stoffeigenschaftsändern ist Fertigen eines festen Körpers durch Umlagern, Aussondern oder Einbringen von Stoffteilchen, wobei eine etwaige unwillkürliche Formänderung nicht zum Wesen der Verfahren gehört. Zum Stoffeigenschaftsändern durch Umlagern von Stoffteilchen zählen die Verfahren, bei denen das Gefüge oder das Kristallgitter oder beide verändert werden wie das Härten und Anlassen sowie ferner die Verfahren, die ohne wesentliche Formänderung durch örtliches Umformen allein der Kaltverfestigung dienen (zum Beispiel Festwalzen und Glattwalzen), und schließlich diejenigen Verfahren, bei denen die Stoffeigenschaften durch Wirkmedien verändert werden (zum Beispiel Magnetisieren). Zum Stoffeigenschaftsändern durch Aussondern von Stoffteilchen gehört beispielsweise das Entkohlen und zum Stoffeigenschaftsändern durch Einbringen von Stoffteilchen zum Beispiel das Aufkohlen und das Nitrieren.

Eine andere technische Einteilung für Wärmebehandlungsverfahren erfolgt nach der Art des Verfahrens in

- **thermische Verfahren** (Verändern des Mikrogefüges): Dabei wird das Gussteil bestimmten Temperatur-Zeit-Folgen ausgesetzt. Die Veränderung

des Mikrogefüges und damit die Veränderung der Eigenschaften erfasst das gesamte Gussteil. Die Kinetik der Gefügeumwandlung wird mit Zeit-Temperatur-Austenitisierungs- (ZTA-Schaubildern) (**Bilder 64 und 65**) [56, 57] und Zeit-Temperatur-Umwandlungsschaubildern (ZTU-Schaubildern) (**Bilder 66 und 67**) [58 - 60] beschrieben. Wird nur eine partielle Erwärmung auf eine bestimmte Temperatur in oberflächennahen Bereichen durchgeführt, so handelt es sich um eine Randschichtbehandlung (siehe unter 5.5). Das Mikrogefüge und damit die Eigenschaften in der Randschicht werden verändert. Im Kern des Gussteils bleiben die ursprünglich vorhandenen Eigenschaften erhalten.

- **thermochemische Verfahren** (Einbringen von Stoffteilchen): Bei den thermochemischen Verfahren wird die chemische Zusammensetzung eines Gussteils durch Einlagern eines oder mehrerer Elemente in der Randschicht absichtlich verändert, um bestimmte Eigenschaften der Randschicht zu verändern.
- **thermomechanische Verfahren** (Kombination von Umformen und Wärmebehandlung): Bei der Teilefertigung durch Gießen entfallen die Verfahren des Umformens. Somit haben thermomechanische Verfahren der Wärmebehandlung für Gussteile keine Bedeutung.

Wärmebehandlungen an Gussteilen aus Gusseisen mit Kugelgraphit werden mit unterschiedlichen Zielsetzungen durchgeführt. Hierzu gehören das Einstellen der Werkstoffsorten, das Gewährleisten von Werten für die Kerbschlagzähigkeit, das Steigern von Zugfestigkeit, Härte und Verschleißwiderstand, das Vermeiden von Verzug und Rissbildung im Betrieb sowie das Einstellen bestimmter physikalischer Eigenschaften. Um das zu erreichen, gibt es folgende Möglichkeiten:

- Ändern der Menge an gebundenem Kohlenstoff;
- Herstellen von Härtings- und Vergütungsgefügen;
- Beseitigen von Gussstressungen;
- Randschichtbehandlungen.

Die drei erstgenannten Verfahrensvarianten beeinflussen die Gussteile im gesamten Volumen, die vierte Variante verändert nur die Eigenschaften der Randschicht der Gussteile.

Einerseits haben einige Wärmebehandlungsverfahren bei Gusseisen mit Kugelgraphit an Bedeutung verloren. Die Mikrogefüge und damit die mechanischen Eigenschaften der Grundsorten des Gusseisens mit Kugelgraphit nach **DIN EN 1563** können in den meisten Fällen im Gusszustand erreicht werden. Nur bei den kaltzähigen Sorten EN-GJS-350-22-LT und EN-GJS-400-18-LT ist in einigen Fällen eine Glühbehandlung zum Einstellen eines einwandfreien ferritischen Grundgefüges erforderlich, und die rein ferritische Stranggussorte GJS-400-15C wird grundsätzlich gegläht. Duktile Rohre aus Gusseisen mit Kugelgraphit werden in jedem Fall wärmebehandelt. Auch ein Glühprozess zum Verringern von Gussstressungen gehört zum Produktionsprozess in der Gießerei. Andererseits haben Wärmebehandlungsvarianten zur Verbesserung der Eigenschaften an Bedeutung gewonnen. Dazu gehören die Wärmebehandlung für die hochfesten Sorten des Gusseisens mit Kugelgraphit nach **DIN EN 1564** und alle Randschichtbehandlungen.

Ob eine Wärmebehandlung von Gusseisen mit Kugelgraphit durchgeführt wird oder nicht, entscheidet der Hersteller. In der europäischen Norm **DIN EN 1553** heißt es: „... jede Wärmebehandlung ist, sofern der Käufer nichts festgelegt hat, dem Ermessen des Herstellers zu überlassen.“



Bild 62: Wärmebehandlungsanlage für ADI-Gusseisen (Bild: ADI Treatment Ltd., West Bromwich)

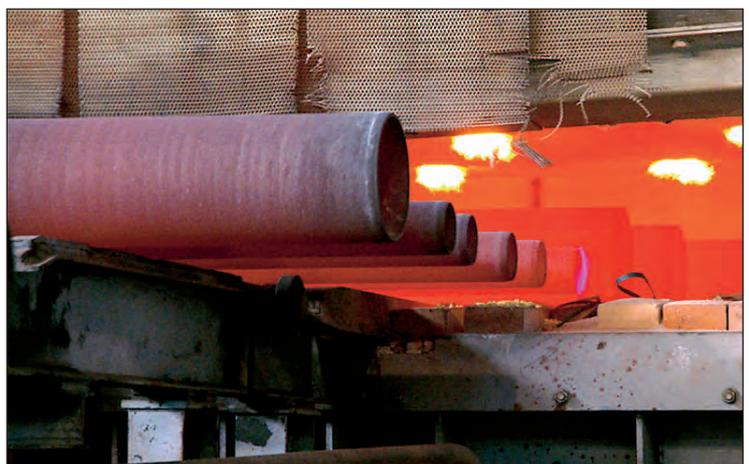


Bild 63: Gussrohre beim Einschleusen in die Durchlauf-Wärmebehandlungsanlage (Bild: FACHGEMEINSCHAFT GUSS-ROHRSYSTEME, Berlin)

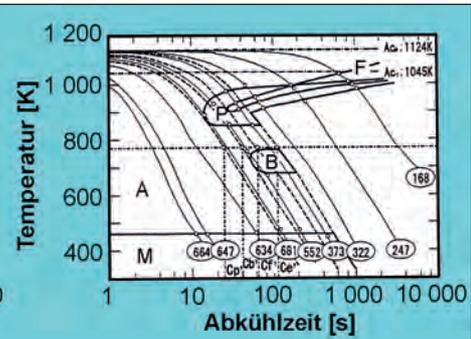
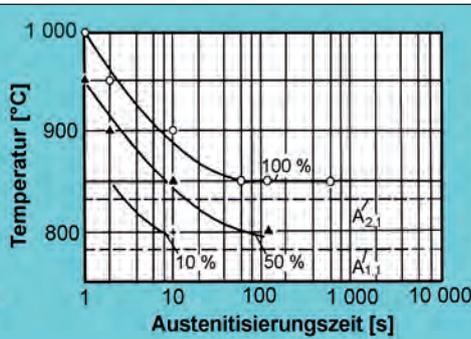
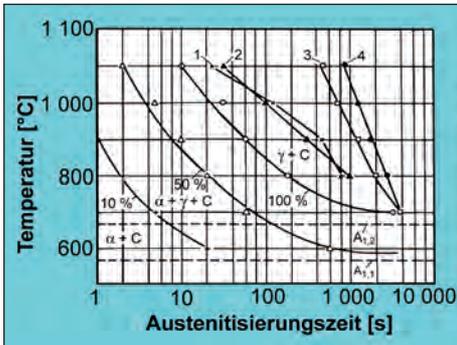


Bild 64: Isothermisches ZTA-Diagramm für ferritisches Gusseisen mit Kugelgraphit

- 1 Erreichen des gebundenen C-Gehaltes von 0,8 %
- 2 Erreichen der Maximalhärte von HV_{0,05}
- 3 Ende der isothermen Längenzunahme
- 4 Ende der Graphitauflösung

Bild 65: Isothermisches ZTA-Diagramm für perlitisches Gusseisen mit Kugelgraphit

Bild 66: Kontinuierliches ZTU-Diagramm für Gusseisen mit Kugelgraphit

5.1 Thermische Verfahren

Über die Varianten der thermischen Wärmebehandlungsverfahren ist ausführlich in [61] hinsichtlich der Begriffe, des angestrebten Zieles und der Temperatur-Zeit-Folgen berichtet worden. Im **Bild 68** sind die Temperatur-Zeit-Folgen für die Varianten der Wärmebehandlung zusammengestellt. Die **Tabelle 1** enthält eine Zusammenfassung der wichtigen Wärmebehandlungsparameter. Bei der vorliegenden Gliederung werden das Oberflächenhärten/Randschichthärten und die thermochemischen Wärmebehandlungsverfahren im Kapitel Randschichtbehandlung vorgestellt. Die Wärmebehandlungsverfahren zum Einstellen hoher Festigkeiten sind in **Bild 69** [62, 63] nochmals hervorgehoben. Für die Temperatur-Zeit-Abläufe der Grundvarianten sind zur Orientierung das eutektoide Intervall $A_{1,1}$ und $A_{1,2}$ und ein isothermisches ZTU-Diagramm stark vereinfacht eingezeichnet. Die Grundvarianten I, III und V enthalten eine vollständige Austenitisierung und die Grundvarianten II, IV und VI eine unvollständige Austenitisierung innerhalb des eutektoiden Intervalls. Die Grundvariante I ist das klassische Vergüten (Härten und Anlassen) und die Grundvariante III das klassische Bainitieren (Zwischenstufenvergüten). Mit der Grundvariante V werden die Sorten des austenitisch-ferritischen Gusseisens mit Kugelgraphit durch unvollständiges Bainitieren (unvollständiges Zwischenstufenvergüten) hergestellt.

Metallkundliche Grundlagen zur Wärmebehandlung werden in [12, 13] vorgestellt.

5.1.1 Austenitisieren

Für das Verändern des Mikrogefüges und damit der mechanischen Eigenschaften ist das Austenitisieren des Gusseisens mit Kugelgraphit ein wichtiger Verfahrensschritt. Ziel des Austenitisierens ist es, bei Temperaturen zwischen etwa 820 und 950 °C einen mit Kohlenstoff gesättigten Austenit als Ausgangszustand für weitere Verfahrensvarianten einzustellen [57]. Beim Austenitisieren finden folgende Gefügeumwandlungen statt:

- Der Perlit und der Ferrit des Mikrogefüges im Gusszustand wandelt in Austenit um.
- Eventuell vorhandener Ledeburit im Gussgefüge löst sich im Austenit auf.
- Der Austenit sättigt sich mit Kohlenstoff.

Bei ursprünglich perlitischen Gefügen stellt sich aufgrund des hohen gebundenen Kohlenstoffgehalts relativ schnell ein mit Kohlenstoff gesättigter Austenit ein. Bei ferritischen Ausgangsgefügen muss der Kohlenstoff von den im Gefüge vorliegenden Graphitkugeln in den Austenit diffundieren. Die dafür erforderliche Zeit ist von den Diffusionswegen und der Austenitisierungstemperatur abhängig. Das Zusammenspiel zwischen Austenitisierungstemperatur und der für eine Austenitisierung erforderlichen Zeit beschreiben ZTA-Schaubilder [56, 57]. Für ein Gusseisen mit Kugelgraphit mit 3,26 % C; 2,64 % Si; 0,92 % Mn; 0,093 % Cr; 0,14 % P und 0,06 % S sind isothermische ZTA-Diagramme für ein ferritisches und für ein perlitisches Gusseisen mit Kugelgraphit experimentell ermittelt worden (**Bilder 64 und 65**). Die Graphitkugeln hatten einen Durchmesser von 40 bis 60 Mikrometer. Es zeigt sich ein deutlicher Unterschied für das Verhalten des Werkstoffs bei der Austenitisierung in Abhängigkeit vom Zustand der metallischen Grundmasse vor der Austenitisierung. Beim ferritischen Gusseisen mit Kugelgraphit ergeben sich für gleiche Austenitisierungstemperaturen längere Umwandlungszeiten als bei einem perlitischen Ausgangszustand. Beim perlitischen Gusseisen mit Kugelgraphit kann

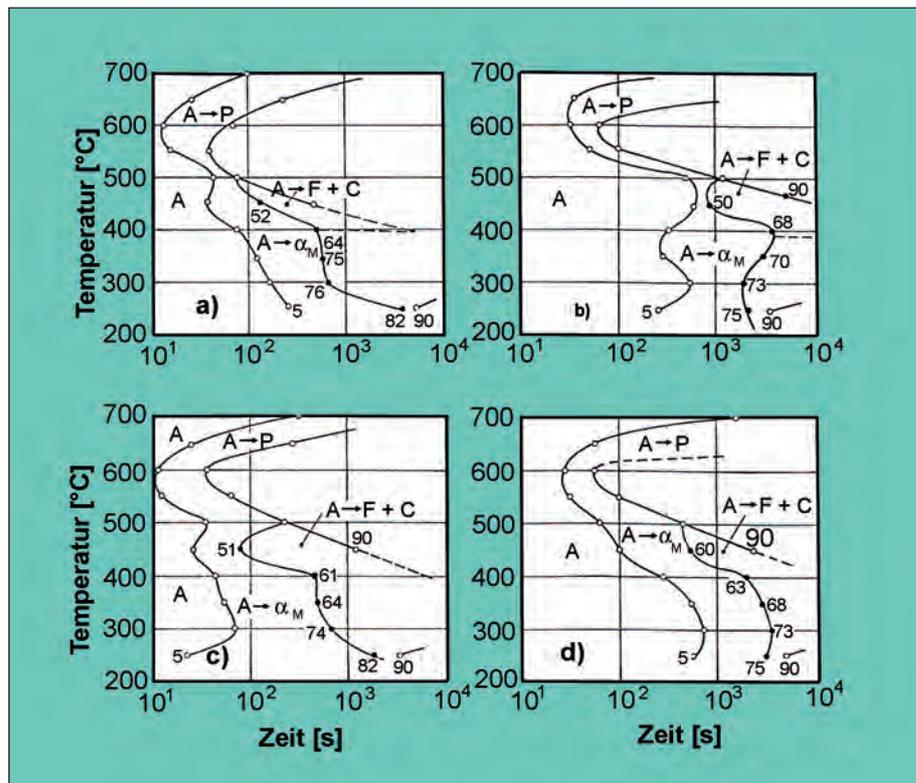


Bild 67: Isothermische ZTU-Diagramme für Gusseisen mit Kugelgraphit
a) unlegiert b) mit 0,8 % Cu legiert c) mit 0,98 % Ni legiert d) mit 2,13 % Ni legiert

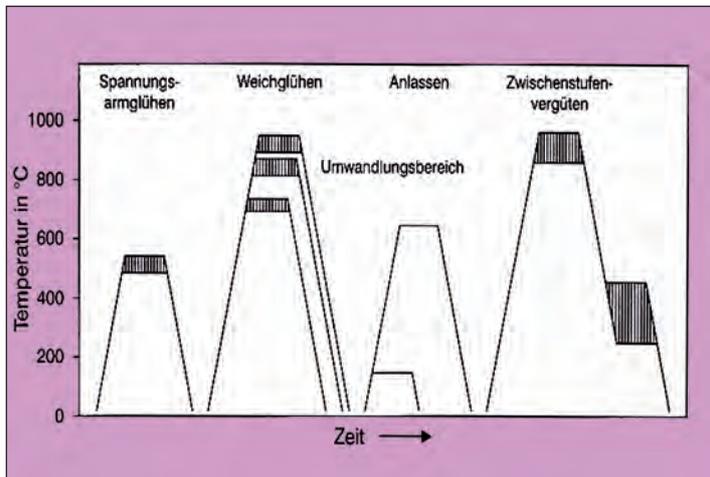


Bild 68: Schematische Darstellung der wichtigsten Wärmebehandlungsverfahren für Gusseisen mit Kugelgraphit

die Austenitisierung und Aufkohlung schneller als beim ferritischen ablaufen, weil der Perlitanteil schnell austenitisiert. Die Ferritzwischenräume werden sehr schnell aufgekohlt. Beim Austenitisieren von ferritischem Gusseisen mit Kugel-

graphit verläuft die Aufkohlung des Austenits bevorzugt entlang ehemaliger Ferritkorngrenzen, und die Kohlenstoff-sättigung entsteht nur durch Nachdiffusion von Kohlenstoff von den Graphitkugeln. Je kleiner der Graphitkugeldurch-

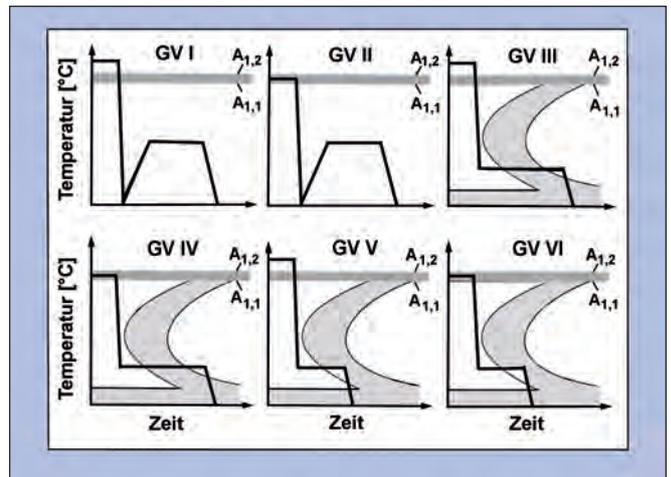


Bild 69: Grundvarianten der Wärmebehandlung für hochfeste Sorten des Gusseisens mit Kugelgraphit

messer d bzw. die Graphitlamellendicke d ist, um so schneller ist der Austenit bei einem ferritischen Ausgangsgefüge mit Kohlenstoff gesättigt (Bild 70 [64]). Die Gefügeumwandlungsprozesse, die beim Austenitisieren von ferritischem und per-

Tabelle 1: Übersicht der wichtigsten Wärmebehandlungsverfahren für Gusseisen mit Lamellen- oder Kugelgraphit

Wärmebehandlungsverfahren	Gusseisensorte	Angestrebtes Ziel	Temperatur [°C]	Zeit ¹⁾	Abkühlen
Spannungsarmglühen	Unlegiert, niedrig legiert, hoch legiert	Beseitigen von Spannungen	500 - 550 560 - 600 600 - 650	1 h + 1 h je 25 mm Wanddicke	Ofenabkühlung 40 K/h bis 300 °C (bis 100 °C für komplizierte Teile)
Weichglühen bei niedriger Temperatur (Ferritisieren, Graphitisieren)	Unlegiert, niedrig legiert	Ferritisches Gefüge, Erreichen bester Zerspanbarkeit	700 - 760	45 min bis 1 h je 25 mm Wanddicke	Ofenabkühlung 55 K/h zwischen 540 und 300 °C
Weichglühen bei mittlerer Temperatur (Ferritisieren, Graphitisieren)	Legiertes Gusseisen und solche Sorten, die für das Glühen bei niedriger Temperatur nicht geeignet sind	Ferritisches Gefüge, Erreichen bester Zerspanbarkeit	790 - 900	> 45 min je 25 mm Wanddicke	Ofenabkühlung von Glüh-temperatur bis 300 °C
Weichglühen bei hoher Temperatur (Ferritisieren, Graphitisieren)	Meliertes oder weißes Gusseisen	Ferritisches Gefüge, Erreichen bester Zerspanbarkeit	900 - 955	1 bis 3 h + 1 h je 25 mm Wanddicke	Ofenabkühlung von Glüh-temperatur bis 300 °C
Weichglühen bei hoher Temperatur	Meliertes oder weißes Gusseisen	Beseitigen von Carbideinschlüssen unter Beibehaltung maximaler Festigkeit und Härte	900 - 955	1 bis 3 h + 1 h je 25 mm Wanddicke ²⁾	Luftabkühlung bis 540 °C, dann Ofenabkühlung bis 300 °C
Perlitglühen (Perlitisieren)	Alle Sorten	Perlitisches Gefüge	850 - 955	1 bis 3 h + 1 h je 25 mm Wanddicke	Luftabkühlung bis 540 °C, dann Ofenabkühlung bis 300 °C
Härten	Alle Sorten	Martensitisches Gefüge höchster Härte	800 - 950	1 h + 1 h je 25 mm Wanddicke	Luft- oder Flüssigkeitsabschreckung auf < 200 °C
Vergüten (Härten mit nachfolgendem Anlassen)	Alle Sorten	Vermindern der Spödigkeit des Martensits	150 - 650	1 h je 25 mm Wanddicke	Luft- oder Ofenabkühlung
Zwischenstufenvergüten	Unlegiert, niedrig legiert	Bainitisches Gefüge (Zwischenstufengefüge)	850 - 950	1 h + 1 h je 25 mm Wanddicke	Luft- oder Flüssigkeitsabschreckung auf 230 bis 400 °C, 1,5 bis 4 h halten

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

²⁾ Die Carbide können häufig bereits in kürzerer Zeit abgebaut werden.

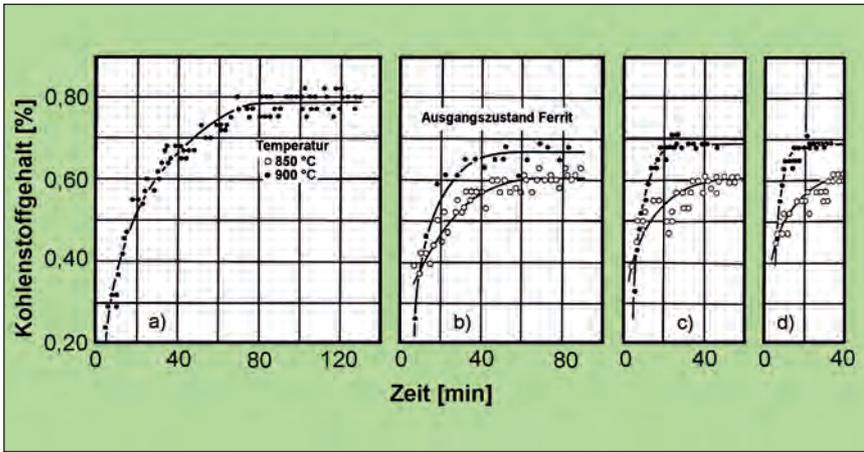


Bild 70: Abhängigkeit des Kohlenstoffgehalts von der Austenitisierungstemperatur und -dauer bei unterschiedlichen Durchmessern der Graphitkugeln einer GJS-Legierung mit 3,6 % C; 2,4 % Si und 0,4 % Mn
a) $d = 55 \mu\text{m}$, b) $d = 43 \mu\text{m}$, c) $d = 25 \mu\text{m}$, d) $d = 18 \mu\text{m}$

litischem Gusseisen mit Kugelgraphit ablaufen, sind ausführlich in [6] beschrieben worden. Die Austenitkorngröße entspricht beim Gusseisen mit Kugelgraphit etwa der von Feinkornstählen. Mit zunehmender Austenitisierungsdauer und Austenitisierungstemperatur nimmt die Austenitkorngröße bei Gusseisen mit Kugelgraphit nur in geringem Maß zu (**Bild 71**) [65, 66].

Nach einer Austenitisierung des Gusseisens mit Kugelgraphit wird das Umwandlungsverhalten des Werkstoffs durch ZTU-Diagramme beschrieben. Im **Bild 66** ist ein kontinuierliches ZTU-Diagramm für ein Gusseisen mit Kugelgraphit mit 3,6 % C; 2,46 % Si; 0,21 % Mn; 0,014 % P; 0,008 % S und 0,043 % Mg dargestellt [58]. Die Austenitisierungstemperatur lag bei 1223 K und die Austenitisierungsdauer bei 900 s. Isothermische ZTU-Diagramme für unlegiertes und legiertes Gusseisen mit Kugelgraphit enthält **Bild 67** [59]. In dem Temperaturgebiet, das für die Herstellung von ausferritischem Gusseisen mit Kugelgraphit wichtig ist, wird keine Linie für eine hundertprozentige Umwandlung angegeben, sondern wie zum Beispiel bei Teilbild c) die Zahlenwerte 61, 64, 74 und 82 %, was bedeutet, dass nur 61, 64, 74 und 82 % des Austenits umgewandelt sind und entsprechend 39, 36, 26 und 18 % Restaustenit vorliegen. Die Austenitumwandlung ist also unvollständig. Weitere ZTU-Diagramme sind in [67] zusammengestellt.

In der technischen Anwendung wird über eine Dauer zwischen 15 Minuten und 4 Stunden bei Temperaturen zwischen 880 und 940 °C austenitisiert, vornehmlich in Elevator-, Hauben- oder Herdwagenöfen. Duktile Rohre aus Gusseisen mit Kugelgraphit werden in Durchlauföfen wärmebehandelt. Beim Austenitisieren von Gusseisen mit Kugelgraphit muss ein Verzundern und eine Randentkohlung möglichst ganz vermieden werden.

5.1.2 Weichglühen bei hoher Temperatur

Gussteile aus Gusseisen mit Kugelgraphit dürfen zur Gewährleistung ihrer typischen mechanischen Eigenschaften und einer guten Zerspanbarkeit keine weißerstarten Gefügebestandteile enthalten. Liegen nach der Erstarrung Anteile von eutektischen (ledeburitischen) Carbiden oder gar Primärcarbide vor, so muss zu deren Beseitigung eine Glüh-Temperatur deutlich oberhalb des eutektoiden Intervalls zwischen 900 und 950 °C gewählt werden. Die Wahl der Abkühlungsgeschwindigkeit aus dem Austenitgebiet ist davon abhängig, welches Mikrogefüge eingestellt werden soll. Diese Wärmebehandlungsvariante wird nur dann notwendig, wenn beim Herstellungsprozess von Gusseisen mit Kugelgraphit nicht optimal gearbeitet wurde.

5.1.3 Weichglühen bei niedriger Temperatur

Diese Wärmebehandlungsvariante dient dem Umwandeln von Perlit in Ferrit. Während beim Weichglühen von Stahl nur ein Einformen des streifigen Perlits in körnigen Perlit erreicht werden kann, führt das Weichglühen von Gusseisen mit Kugelgraphit zu einem rein ferritischen Grundgefüge ohne Anteile von eutektoidem Eisencarbid. Die Glüh-Temperatur liegt dabei knapp unterhalb des eutektoiden Intervalls bei etwa 700 °C. Abgekühlt wird mit einer Geschwindigkeit um 50 K/h.

Beim Herstellen von Gusseisen mit Kugelgraphit der Sorten EN-GJS350-22-LT und EN-GJS-400-18-LT, also von Sorten mit garantierter Kerbschlagzähigkeit bei tiefen Temperaturen, werden die geforderten Werte für die Kerbschlagzähigkeit nicht immer im Gusszustand erreicht. Die be-

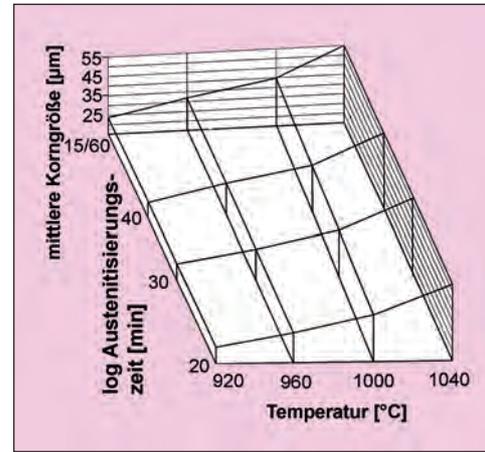


Bild 71: Mittlere Austenitkorngröße in Abhängigkeit von der Austenitisierung

schriebene Wärmebehandlung ist dann Bestandteil der Fertigungsfolge in der Gießerei. Das gilt auch für nach dem Stranggießverfahren verarbeitetes Gusseisen mit Kugelgraphit der Sorte GJS-400-15C, bei der die genannte Wärmebehandlungsvariante zum Produktionsprogramm der Gießerei zählt.

5.1.4 Zweistufiges Weichglühen

Sind beim Gusseisen mit Kugelgraphit höchste Zähigkeitsanforderungen zu erfüllen, können die gewünschten Eigenschaften bei unlegierten Sorten nur durch eine zweistufige Wärmebehandlung erfüllt werden. Sie besteht aus einem Austenitisieren bei 850 bis 950 °C, anschließendem Abkühlen im Ofen oder an Luft und nachfolgendem Halten (5 bis 10 Stunden) am eutektoiden Intervall zwischen 650 und 740 °C. Eine solche Wärmebehandlung wird zum Beispiel bei den duktilen Rohren aus Gusseisen mit Kugelgraphit durchgeführt.

5.1.5 Perlitglühen

Ziel des Perlitglühens ist es, ein vollperlitisches Grundgefüge einzustellen, um bestimmte Festigkeitseigenschaften zu erzielen oder das Grundgefüge in unterschiedlichen Wanddickenbereichen zu vergleichmäßigen. In Anlehnung an die Wärmebehandlung von Stahl wird sie auch als Normalisieren oder Perlitisieren bezeichnet. Beim Perlitglühen wird das Gussteil auf Temperaturen zwischen 900 und 920 °C aufgeheizt, wodurch das Austenitgebiet oberhalb des eutektoiden Intervalls erreicht wird. Anschließend erfolgt eine beschleunigte Abkühlung, um eine Ferritbildung zu unterdrücken. Die optimale Abkühlungsgeschwindigkeit wird je nach Gussteilwanddicke mit Hilfe ruhender Luft, Anblasen mit Druckluft oder durch Wassersprühnebel eingestellt.

5.1.6 Härten

Als Eisen-Kohlenstoff-Silicium-Werkstoff kann Gusseisen mit Kugelgraphit ebenso gehärtet werden wie Stahl. Das Härten von Gusseisen mit Kugelgraphit zielt entweder auf die Bildung einer verschleißbeständigen Randschicht (siehe 5.2) oder es dient als Vorstufe für das Vergüten. Damit erreicht Gusseisen mit Kugelgraphit eine hohe Härte von 45 bis 60 HRC und einen hohen Verschleißwiderstand.

Beim Härten wird das Gussteil bei Temperaturen zwischen 850 und 950 °C oberhalb des eutektoiden Intervalls erwärmt. Während der Austenitisierung wird der Austenit bis zur Sättigung aufgekohlt. Kohlenstoffquellen sind dabei das eutektoiden Carbide des Perlit und die Graphitkugeln. Das anschließende schnelle Abkühlen (Abschrecken) des Gussteils verhindert eine Ferrit- oder Perlitbildung und führt zu einer Grundmasse aus Martensit und Restaustenit. Die erforderlichen hohen Abkühlungsgeschwindigkeiten werden durch Eintauchen des Gussteils in Öl, Emulsionen oder Wasser eingestellt. Das Härten des ganzen Gussteilvolumens ist die erste Stufe des Vergütens.

5.1.7 Vergüten

Das Vergüten ist eine Kombination von Härten als erste Stufe und anschließendem Wiedererwärmen (Anlassen) als zweite Stufe. Durch das Vergüten von Gusseisen mit Kugelgraphit lassen sich die mechanischen Eigenschaften durch Variation der Anlasstemperatur deutlich in Richtung höherer Festigkeiten einstellen (Bild 72) [68]. Zugfestigkeit und Dehngrenze erreichen Werte wie bei Vergütungsstählen. Jedoch sind oft die Werte für ausreichende Plastizität und Zähigkeit relativ schwer einstellbar. Das Vergüten von Gusseisen mit Kugelgraphit wird relativ selten angewendet, insbesondere deshalb, weil mit dem isothermischen Austenitumwandeln weit interessantere mechanische Eigenschaften bereitgestellt werden können.

Beim Anlassen wird das Abschreckgefüge des Härtens (Martensit und Restaustenit) durch Wiedererwärmen schrittweise abgebaut. Die Anlasstemperatur liegt in Abhängigkeit von den zu erzielenden mechanischen Eigenschaften zwischen 150 und 650 °C. Mit zunehmender Anlasstemperatur nehmen die Zugfestigkeit, Dehngrenze und Härte ab, während Bruchdehnung und Kerbschlagzähigkeit zunehmen. Mit steigenden Anlasstemperaturen werden mehrere Anlasstufen durchlaufen, die beim Gusseisen mit Kugelgraphit wegen des vorhandenen Siliciumgehalts im Gegensatz zu den Stählen bis zu einem carbidgefreien Zustand – also einer rein ferritischen Grundmasse – führen [69].

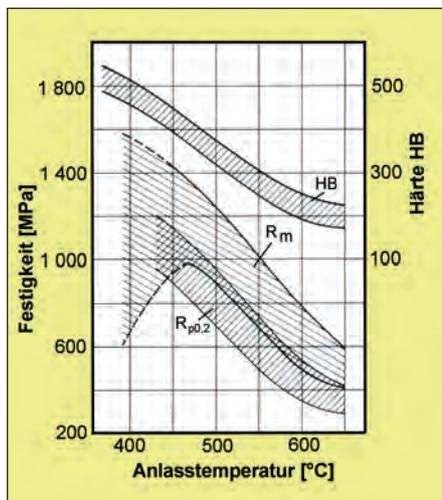


Bild 72: Einfluss der Anlasstemperatur auf die mechanischen Eigenschaften von Gusseisen mit Kugelgraphit

5.1.8 Bainitisieren (Zwischenstufenvergüten)

Das isothermische Austenitumwandeln bei Temperaturen unterhalb der Perlitstufe und oberhalb der Martensitstufe wird traditionell als Zwischenstufenvergüten oder heute besser als Bainitisieren bezeichnet. Beim Gusseisen mit Kugelgraphit hat diese Wärmebehandlung mit vollständiger Bainitisierung nicht zu besonders guten mechanischen Eigenschaften geführt. Es ergeben sich damit zwar hohe Festigkeiten, jedoch sind die Bruchdehnungen sehr gering. Diese Sorten des Gusseisens mit Kugelgraphit haben aber einen hohen Verschleißwiderstand. Jedoch ergab sich auf diesem Gebiet eine spezielle Wärmebehandlungsvariante mit einer unvollständigen isothermischen Austenitumwandlung nach vollständiger Austenitisierung, die beim Gusseisen mit Kugelgraphit eine vorzügliche Kombination von hohen Festigkeiten und hoher Plastizität und Zähigkeit bewirkt. Es entstehen dabei die austenitisch-ferritischen Sorten des Gusseisens mit Kugelgraphit, die bei

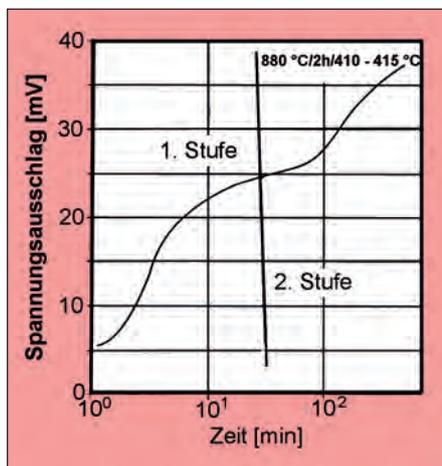


Bild 73: Zweistufiger Umwandlungsprozess bei isothermischer Umwandlung von Gusseisen mit Kugelgraphit im Bainitgebiet

hohen Festigkeiten auch eine hohe Plastizität und Zähigkeit aufweisen (siehe 5.1.9).

Beim Gusseisen mit Kugelgraphit ist das Bainitisieren ein wegen des hohen Siliciumgehaltes zweistufiger Umwandlungsprozess. Bild 73 zeigt schematisch ein Gefügemengen-Zeit-Diagramm mit dieser Besonderheit. Während der 1. Stufe entwickelt sich aus dem Austenit ein Mikrogefüge aus Ferritnadeln und einem mit Kohlenstoff gesättigten Restaustenit ohne Carbide (ausferritisches Gusseisen mit Kugelgraphit). Zwischen der 1. und der 2. Umwandlungsstufe kommt der Umwandlungsprozess praktisch zum Stillstand und kann damit technologisch gut genutzt werden. Während der 2. Umwandlungsstufe entstehen erst die für bainitische Gefüge typischen Carbide, und der Restaustenit verarmt dadurch wieder an Kohlenstoff. Am Ende der 2. Umwandlungsstufe ist der Austenit aufgebraucht und das Mikrogefüge besteht aus Ferritnadeln und Carbiden. Das Ergebnis ist dann ein bainitisches Gusseisen mit Kugelgraphit.

5.1.9 unvollständiges Bainitisieren

Beim isothermischen Austenitumwandeln wird das Gussteil aus Gusseisen mit Kugelgraphit zunächst bei 875 bis 920 °C vollständig austenitisiert. Werden die Gussteile dann schnell in ein Salzbad mit Temperaturen zwischen 300 und 400 °C umgesetzt, beginnt die Austenitumwandlung mit der Bildung von Ferritnadeln und einer Sättigung der verbleibenden Austenitanteile mit Kohlenstoff, die zu einer Stabilisierung dieses Restaustenits führen. Die Ms-Temperatur des Restaustenits fällt auf sehr niedrige Temperaturen, so dass eine Martensitbildung bis zu -100 °C nicht erfolgt. Die Carbidbildung unterbleibt und die Austenitumwandlung kommt nahezu zum Stillstand. Es handelt sich um eine unvollständige isothermische Austenitumwandlung, ein unvollständiges Bainitisieren. Nach dem Abkühlen aus dem Salzbad auf Raumtemperatur liegt dann ein Grundgefüge aus nadligem Ferrit und hohen Restaustenitanteilen von bis zu 40 % vor.

Die Sorten des Gusseisens mit Kugelgraphit, die durch das isothermische Austenitumwandeln hergestellt werden können, sind unter der Bezeichnung **ADI (Austempered Ductile Iron)** am meisten bekannt geworden. Sie werden auch als bainitisches Gusseisen bezeichnet und in naher Zukunft wahrscheinlich als austenitisch-ferritisches Gusseisen mit Kugelgraphit. Bei diesen Werkstoffsorten des hochfesten Gusseisens mit Kugelgraphit ist eine sorgfältige Abstimmung von chemischer Zusammensetzung des Gusseisens, der Gussteilwanddicke und der Wärmebehandlungsparameter erforderlich. Erst die Ermittlung präziser Prozessfenster für diese Abhängigkeiten führen zu einer Prozesssicheren Produktion.

5.1.10 Spannungsarmglühen

Ein Gussteil ohne innere Spannungen (Eigenspannungen, Gussspannungen) herzustellen, ist wegen der unterschiedlichen Abkühlungsgeschwindigkeiten innerhalb eines Gussteils nicht möglich. Die Höhe und die Richtung dieser Gussspannungen sind von der Geometrie des Gussteils und den Verfahrensbedingungen beim Gießen abhängig. Bei den meisten Gussteilen aus Gusseisen mit Kugelgraphit sind diese Gussspannungen jedoch so gering, dass sie die Beanspruchbarkeit nicht beeinträchtigen.

Das Spannungsarmglühen ist eine Wärmebehandlung, die speziell zum Abbau der Gussspannungen eingesetzt wird. Die Glühtemperaturen zwischen 500 und 550 °C liegen unter dem Bereich der eutektoiden Umwandlung, wodurch eine unerwünschte Gefügeveränderung und damit eine Änderung der mechanischen Eigenschaften während des Glühprozesses vermieden wird. Um zu verhindern, dass weitere Eigenspannungen beim Spannungsarmglühen durch das Aufheizen und das Abkühlen entstehen, müssen Aufheizgeschwindigkeiten zwischen 10 und 50 K/h und Abkühlungsgeschwindigkeiten zwischen 25 und 50 K/h eingehalten werden.

5.1.11. Wärmebehandlung beim austenitischen Gusseisen mit Kugelgraphit

Wenn Gussteile aus austenitischem Gusseisen mit Kugelgraphit für statische oder zyklische Beanspruchungen bei Temperaturen oberhalb 500 °C eingesetzt werden sollen und enge Maßtoleranzen einzuhalten sind, wird ein Hochtemperatur-Stabilisierungsglühen empfohlen. Dabei wird mit einer Geschwindigkeit von maximal 150 K/h bis zu Glühtemperaturen im Bereich von 875 bis 900 °C aufgeheizt und anschließend im Ofen mit maximal 50 K/h auf 500 °C und weiter an Luft abgekühlt.

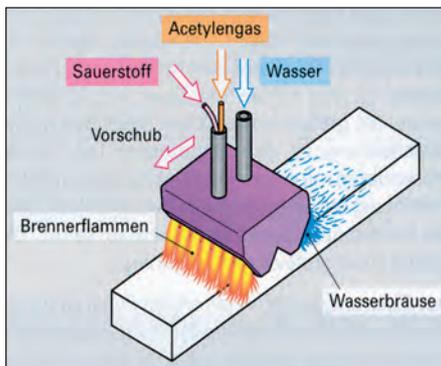


Bild 74: Prinzip des Flammhärten (Bild: Verlag Europa-Lehrmittel, Haan-Guiten)

5.2 Randschichtbehandlungen

Zu den Randschichtbehandlungen werden das Oberflächenhärten (Flamm-, Induktions-, Laserstrahlhärten), die chemisch-thermischen Wärmebehandlungsverfahren, das Randschicht-Umschmelzen, das Randschicht-Umschmelzlegieren und Oberflächen-Umformen (Festwalzen, Glattwalzen, Kugelstrahlen) gezählt.

Unter **Oberflächenhärten** wird das Härten der Randschicht eines Gussteils verstanden. Dabei wird eine harte Oberfläche am Gussteil erzeugt, die einen hohen Verschleißwiderstand hat und hohe Flächenpressungen aufnehmen kann. Im Kern bleibt das Gussteil zäh und weicher und kann gut stoßartige und wechselnde Beanspruchungen aufnehmen. Die tiefer liegenden Gussteilbereiche werden in der kurzen Aufwärmzeit nicht bis auf Härtetemperatur erwärmt und bleiben deshalb ungehärtet.

Beim **Flammhärten** (Brennhärten) wird bei den zu härtenden Gussteilen die Randschicht ganz oder teilweise durch Brennerflammen in das Austenitgebiet erhitzt und durch eine Wasserbrause abgeschreckt und dadurch gehärtet (Bild 74). Es können Einhärtetiefen zwischen 2 und 10 mm erzeugt werden.

Beim **Induktionshärten** wird die Wärme durch Induktion eines Wirbelstroms in das Gussteil erzeugt. Eine Kupferspule, die der Gussteilgeometrie angepasst sein muss, wird mit einem hochfrequenten Wechselstrom betrieben und dadurch ein Wirbelstrom in der Randschicht induziert (Bild 75). Eine nachgeführte Wasserbrause schreckt anschließend die Randschicht ab. Die Einhärtetiefe ist abhängig von der Vorschubgeschwindigkeit der Spule, der Stromstärke und der Stromfrequenz.

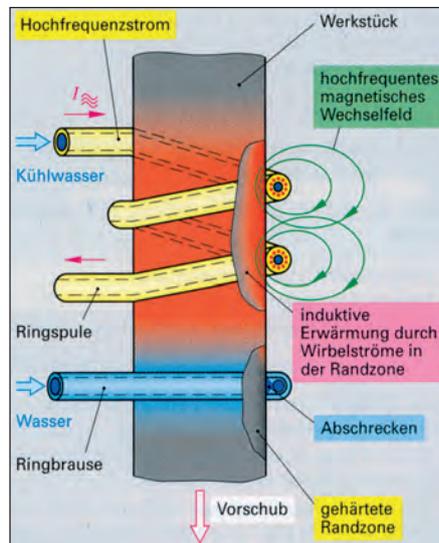


Bild 75: Prinzip des Induktionshärten (Bild: Verlag Europa-Lehrmittel, Haan-Guiten)

Beim **Laserstrahlhärten** erfolgt der Energieeintrag über einen Laserstrahl. Verwendet werden als Strahlquellen CO₂-Laser und NdYAG-Laser. Das Härten durch einen Laserstrahl erfolgt punktgenau. Das Abkühlen erfolgt meist durch Selbstkühlung durch den Gussteilwerkstoff, dessen Wärmeleitung sehr groß ist. Die sehr rasche Wärmeabfuhr in den kalten Grundwerkstoff des Gussteils führt dazu, dass zum Beispiel auf eine Wasserbrause verzichtet werden kann.

Bei Laufflächen eines Getriebedeckels aus EN-GJS-600-03 ergab sich durch Laserstrahlhärten auf eine Tiefe von 0,5 mm eine Oberflächenhärte von annähernd 800 HV. Verwendung fand ein CO₂-Laser. Die auftreffende Leistung lag bei 1300 W, die Vorschubgeschwindigkeit bei 1 m/min. Es trat praktisch kein Verzug auf [70].

Eine spezielle Art des Laserstrahlhärten ist das **Punkthärten einer Oberfläche**. Mit dem Laserstrahl werden nur einzelne Punkte gehärtet, die auf der Oberfläche ein bestimmtes Muster bilden. Das Punkthärten von Gusseisen mit Kugelgraphit erfolgte mit einem CO₂-Laser. Die Mikrohärtete erreichte 900 bis 1000 HV. Das Mikrogefüge besteht aus Martensit mit eingelagerten Graphitkugeln [71].

Bei einem austenitisch-ferritischen Gusseisen mit Kugelgraphit (ADI) (870 °C/2 h/370 °C/1 h) wurde vor dem Laserstrahlhärten die Probenoberfläche mit Ruß beschichtet, um die Laserstrahlung besser zu koppeln. Verwendung fand ein 1,5-kW-CM-CO₂-Laser. Eingebracht wurde eine Leistung zwischen 500 bis 800 W. Der Laserstrahldurchmesser lag bei 2 mm und die Vorschubgeschwindigkeit bei 60 mm/s. Es wurde eine Oberflächenmikrohärtete von 850 bis 1200 HV erreicht. Die gehärtete Schicht war etwa 0,3 mm dick [72].

Das **Elektronenstrahlhärten** erfolgt durch einen gebündelten Elektronenstrahl im Hochvakuum. Beim Oberflächenhärten von Gussteilen wird dieses Verfahren selten angewendet.



Bild 76: Kolben für Schiffsdieselmotoren, Notstromaggregate und Lokomotiven aus EN-GJS-700-2 im Nennweitenbereich von 160 bis 640 mm und Gewichten von 15 bis 500 kg (Bild: Silbitz Guss)

5.3 Chemisch-thermische Verfahren

Zu den interessierenden chemisch-thermischen Wärmebehandlungsverfahren gehören vor allem das Nitrieren, Chromatieren, Aluminieren und Borieren. Nachfolgend wird nur auf das Nitrieren eingegangen.

Nitrieren ist eine chemisch-thermische Behandlung zur Diffusionsättigung der Randschicht bei Stahl- oder Gusseisen-teilen mit Stickstoff beim Erwärmen in einem stickstoffhaltigen Medium. Das Nitrieren verfolgt den Zweck, durch Aufnahme von Stickstoff in die Randschicht, die Härte, den Verschleißwiderstand, die Dauerfestigkeit und auch die Korrosionsbeständigkeit zu erhöhen.

Die Vorgänge beim Nitrieren basieren auf dem Zustandsdiagramm Eisen - Stickstoff. Beim Nitrieren unterhalb der eutektoiden Temperatur sättigt sich zunächst der α -Mischkristall mit Stickstoff an. Dann bildet sich das Nitrid Fe_4N (γ -Phase). Nach deren Sättigung entsteht als weitere Phase das Nitrid Fe_2N (ϵ -Phase). Die Härte der Randschicht beruht nicht auf der Martensitbildung. Damit entfällt das Abschrecken. Die Nitrierschichtdicke beträgt 0,05 bis 1,2 mm.

Das Nitrieren wird in Salzbadern oder in einer Gasphase durchgeführt. Das Badnitrieren erfolgt in Zyansalzbadern und ist wegen der gleichzeitig ablaufenden Aufkohlung eigentlich ein Carbonitrieren. Die verwendeten Salzbadern bestehen entweder aus Natrium- oder Calciumcyanid mit geringen Zusätzen an Chloriden. Eine Aufkohlung der Randschicht ist bei Gusseisen mit Kugelgraphit nicht notwendig.

Das Gasnitrieren basiert auf der Verwendung von Ammoniak, der bei den ange-

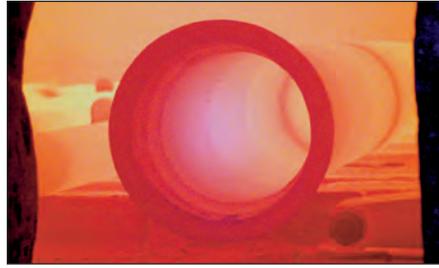


Bild 77: Gussrohr im Wärmebehandlungs-ofen (Bild: FACHGEMEINSCHAFT GUSS-ROHRSYSTEM, Berlin)

wendeten Temperaturen zwischen 500 und 560 °C thermisch dissoziiert. Damit steht der benötigte atomare Stickstoff an der Gussteiloberfläche zur Verfügung. Die Nitrierdauer ist relativ lang. Eine Verringerung der Nitrierdauer ist durch Nutzung von Glühmüllungen und Zusatz oxidierender Gase möglich.

Im **Bild 78** sind für das Gasnitrieren Nitrierkurven für Gusseisen mit Kugelgraphit der Sorte GJS-400-15C (Strangguss) dargestellt. Bei einer Nitriertemperatur von 510 °C und einer Nitrierdauer von 36 Stunden wurde eine Nitrierhärte von 0,2 mm (Kurve a) sowie bei einer Nitriertemperatur von 580 °C und einer Nitrierdauer von 5 Stunden eine Nitrierhärte von 0,1 mm erreicht (Kurve b) [34].

Diese Untersuchungen zeigen, dass Gusseisen mit Kugelgraphit genau so wie Stahl erfolgreich nitriert werden kann. Angewendet wurde das Gasnitrieren bei einem Zahnkranz aus Gusseisen mit Kugelgraphit der Sorte GJS-400-15C (**Bild 79**). Dieser Zahnkranz hat folgende Merkmale: Modul 3,5, 20 Zähne, Grundkreis 63 mm, 44 Einheiten Mindesthärte auf den nitrierten Zahnflanken, Innen- und Außendurchmesser nach dem Nitrieren geschliffen. Die Anforderungen an das Nitrieren des Zahnkranzes konnten wie bei einem Stahlzahnkranz voll erfüllt werden [34].

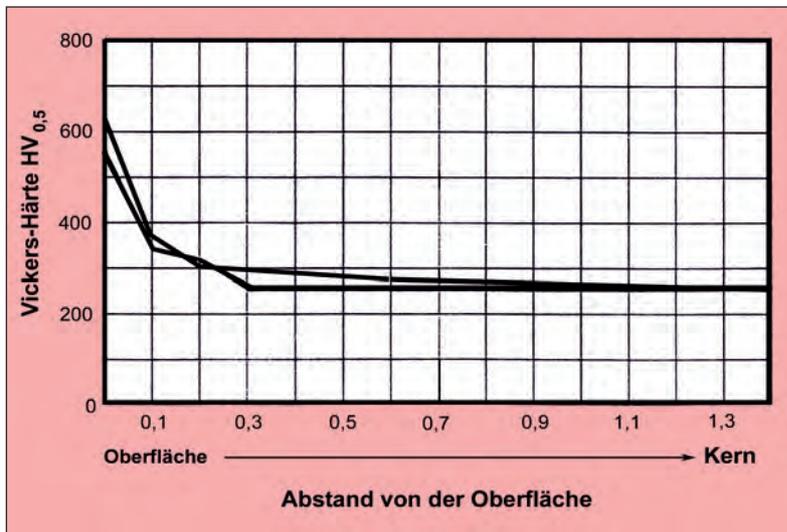


Bild 78: Nitrierkurven für GJS-400-15C (Strangguss)

5.4 Beschichten

Beschichten ist das Aufbringen einer fest haftenden Schicht aus formlosem Stoff auf Werkstücke. Das Beschichten ist die Hauptgruppe 5 der Fertigungsverfahren nach **DIN 8580** als Bezeichnung für eine Gruppe verschiedener Fertigungsverfahren, bei denen ein Beschichtungswerkstoff auf ein Werkstück aufgebracht wird und eine fest haftende Schicht bildet. Dabei kann es sich um eine dünne oder eine dicke Schicht handeln. Die Unterscheidung ist nicht genau definiert und orientiert sich am Beschichtungsverfahren und Anwendungszweck.

Die Hauptgruppe 5 umfasst das

- Beschichten aus dem gas- oder dampfförmigen Zustand (zum Beispiel Aufdampfen),
- Beschichten aus dem flüssigen, breiigen oder pastenförmigen Zustand (zum Beispiel Anstreichen, Spritzlackieren, Tauchemaillieren, Auftrags-schweißen),
- Beschichten aus dem ionisierten Zustand durch elektrolytisches oder chemisches Abscheiden (zum Beispiel Galvanisieren),
- Beschichten aus dem festen (körnigen oder pulverigem) Zustand (zum Beispiel Pulverbeschichten).

Das Beschichten von Oberflächen ist ein sehr variantenreiches Gebiet. Für das Gusseisen mit Kugelgraphit werden einige ausgewählte Beispiele vorgestellt.

5.4.1 Emaillieren

Zum Emaillieren wird der Beschichtungswerkstoff (Emaillenschlicker) durch Tauchen oder Spritzen auf die zu beschichtende Oberfläche aufgetragen. Nach einem Trocknungsprozess des Emaille-

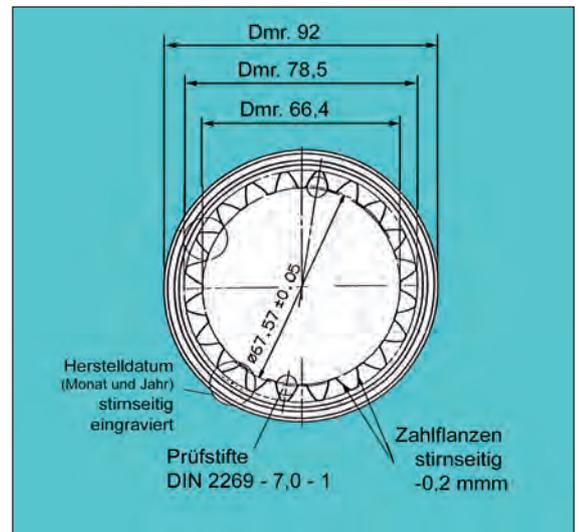


Bild 79: Zahnkranz aus Gusseisen mit Kugelgraphit

schlickers wird dieser bei Temperaturen von 700 bis 900 °C gebrannt. Das Emaillieren wird für korrosionsbeständige, hitzebeständige und dekorative Beschichtungen angewendet. Im **Bild 80** sind emaillierte und komplett in der Gießerei montierte Hydranten dargestellt. Die Gießereien bieten auf diesem Gebiet nicht nur Gussleistungen an, sondern entwickeln auch eigene Emaillierungen und realisieren auch andere Beschichtungslösungen für die Verbesserung der Ästhetik der Gussoberfläche und den Korrosionsschutz. Zudem werden komplette Bearbeitungsleistungen einschließlich der Montage angeboten.

5.4.2 Pulverbeschichten

Das umweltfreundliche lösungsmittelfreie Pulverbeschichten ist ein Beschichtungsverfahren, bei dem in der Regel elektrisch leitfähiger Werkstoff mit Pulverlacken beschichtet wird. Dabei wird das Pulver elektrostatisch oder tribostatisch auf die zu beschichtende Oberfläche aufgesprüht und anschließend eingebrannt. Vorher ist die Oberfläche gut zu entfetten und gegebenenfalls mit Korrosionsschutzmitteln zu behandeln. Die Einbrenntemperaturen variieren stark. Typische Einbrenntemperaturen liegen zwischen 140 und 200 °C. Typisch sind Pulverlacke auf Basis von Polyurethan-, Epoxid- oder Polyesterharzen. Durch das Einbrennen soll ein dauerhaftes Anhaften und eine gleich-



Bild 80: Emaillierte Hydranten aus Gusseisen mit Kugelgraphit (Bild: Düker, Laufach)

mäßige dichte Beschichtung erreicht werden, was teils durch Koagulation, teils durch Anschmelzen der Partikel erfolgt. Durch unterschiedliche Oberflächenstruktur (glatt, strukturiert, Feinstruktur, Hammerschlag) und entsprechende Pigmente können praktisch fast alle Oberflächeneffekte erzielt werden. Im **Bild 81** sind pulverbeschichtete Führungsstangen zu sehen.

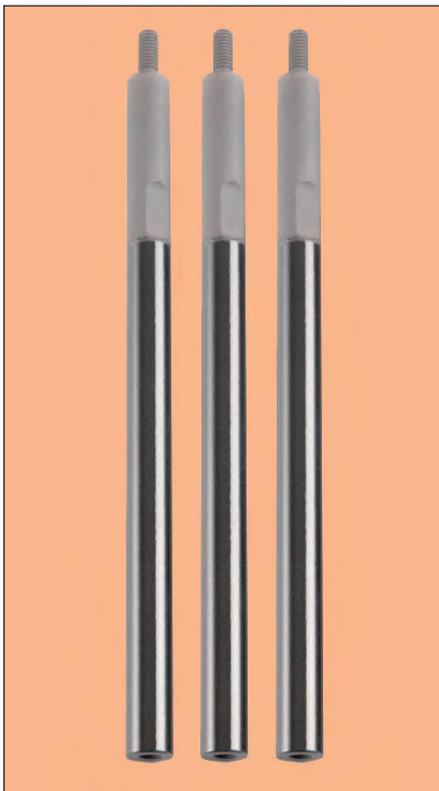


Bild 81: Pulverbeschichtete Führungsstangen aus Gusseisen mit Kugelgraphit (Bild: Düker, Laufach)

5.4.3 Verzinken

Bei duktilen Rohren aus Gusseisen mit Kugelgraphit wird für den Außenschutz ein Zinküberzug aufgebracht. Dieser Zinküberzug besteht aus aufgetragenen Spritzverzinkungen mit metallischem Zink. Für das Verzinken wird ein Zinkdraht in einer Flamme oder einem elektrischen Lichtbogen aufgeschmolzen. Das flüssige Zink wird im Luftstrom auf das rotierende Rohr geschleudert.

Das Zink besitzt einen aktiven Schutzcharakter auf elektro-chemischer Basis und wird seinerseits durch eine bitumöse Deckbeschichtung passiv geschützt. Deshalb kommt es vor allem für den Korrosionsschutz bei Bauwerkteilen aus Stahl und auch aus Gusseisen zum Einsatz, wie bei den im **Bild 82** gezeigten napfförmigen Verbindungsstücken für das Stahltragwerk der wärmedämmenden wabenförmigen Tragwerkshallen der beiden Tropenhäuser des „Eden Projects“ von Cornwall (GB), die sich zu einem Besuchermagnet entwickelt haben. Diese Teile wurden aus Gründen des Korrosionsschutzes und der Angleichung des Aussehens an die ebenfalls verzinkte Stahlkonstruktion feuerverzinkt. Die etwa 80 kg Gussteile wurden im Sandguss aus den Legierungen EN-GJS-400-18 und EN-GJS-500-7 entsprechend den statischen Berechnungen gegossen und entsprechend vorbehandelt.



Bild 82: Verzinkte Napfknoten für das Stahlskelett des Tropenparks „Eden Projekt“ in Cornwall (GB), Gussteile in zwei unterschiedlichen Ausführungen aus EN-GJS-400-18 und EN-GJS-500-7, Gewicht etwa 80 kg (Bild: Pleißner, Elze)

5.4.4 Vernickeln

Das galvanische Beschichten erfolgt als elektrochemische Abscheidung von metallischen Schichten auf metallischen Gegenständen. Dabei wird durch ein elektrolytisches Bad Strom geschickt. Am Pluspol (Anode) befindet sich das Metall, das aufgebracht werden soll (beispielsweise Nickel), am Minuspol (Kathode) der zu beschichtende Gegenstand (in diesem Fall das Gussteil). Der elektrische Strom löst dabei Metallionen von der Verbrauchselektrode ab und lagert sie auf der Oberfläche des zu beschichtenden Gegenstands ab. Je länger sich der zu beschichtende Gegenstand im elektrolytischen Bad befindet, umso dicker wird die Metallschicht. Das Aussehen einer Nickelschicht ist stark vom Einhalten der optimalen Verfahrensparameter abhängig (Glanz- und Zusatzstoffe, Metallionengehalt, Temperatur, pH-Wert).

Bei Castoren (Cask for Storage and Transport of Radioactive Material) wird beispielsweise an der Innenseite elektrolytisch eine Nickelschicht von 3 mm Dicke aufgetragen [73] (Bild 83). An einem Castor mit einer Höhe bis zu 5,9 m, einem Durchmesser von 2,5 m und einem Gewicht von 96 t befindet sich eine zu beschichtende Innenfläche von 30 m². Für die Innenbeschichtung wird 1 t Nickel gebraucht.

5.5 Randschicht-Umschmelzen

Randschicht-Umschmelzen ist ein Sammelbegriff für eine Gruppe von speziellen Randschicht-Behandlungsverfahren, gekennzeichnet durch energieintensiven Wärmeeintrag mit einer Leistungsdichte von mehr als 10⁵ W/cm² und hohen Aufheizgeschwindigkeiten von 10⁷ bis 10⁹ K/s der Randschicht über die Schmelztemperatur mit örtlichem Aufschmelzen und nachfolgender Erstarrung mit hohen Abkühlungsgeschwindigkeiten von 10⁴ bis 10⁷ K/s durch Wärmeabfuhr in die nicht umgeschmolzenen Werkstoffbereiche mit dem Ziel des Härtens (Randschicht-Umschmelz-Härten), oder des Legierens (Randschicht-Umschmelz-Legieren). Als Erwärmungsquellen kommen Lichtbogen, Hochfrequenzinduktion, Laserstrahlen und Elektronenstrahlen zur Anwendung.

Die Laserstrahlbehandlungen von Randschichten zeichnen sich durch eine spezielle Eigenschaft aus: Die Bahnen der Laserstrahlen sind sehr genau und leicht steuerbar. Dadurch lassen sich spezielle geometrische Muster für die Laserstrahlbehandlung auf den Oberflächen von Bauteilen aus metallischen Werkstoffen erzeugen (Honigwabemuster, Mäandermuster u.a.m.), die das tribologische Verhalten (Reibung, Schmierung und Verschleiß) von Reibpaarungen sehr positiv beeinflussen.

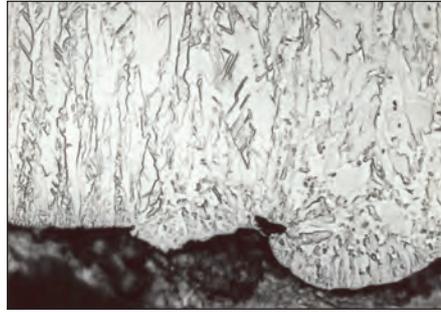


Bild 83: Schliffbild von der vernickelten Castor-Innenfläche (Bild: MTV Metallveredlung, Solingen)

5.5.1 Randschicht-Umschmelz-Härten

Randschicht-Umschmelz-Härten ist eine spezielle Variante zum Erzeugen von feinkristallinen Randschichtgefügen durch energieintensives kurzzeitiges Erwärmen der Randschicht auf Temperaturen oberhalb des Schmelzpunktes mit nachfolgendem Erstarren bei hohen Abkühlungsgeschwindigkeiten. Beim Gusseisen mit Kugelgraphit erfolgt dabei die Erstarrung nach dem metastabilen System. Es entsteht eine weißerstartete Randschicht aus Ledeburit und Martensit und eine darunter liegende gehärtete Schicht.

Mit einem CO₂-Laser wurde die Randschicht von einem Gusseisen mit Kugelgraphit der Sorte EN-GJS-400-12 umgeschmelzgehärtet. Die umgeschmolzene Schicht bestand aus einem feinkörnigen Mikrogefüge aus Austenit und Ledeburit. Die Graphitkugeln waren von einer dünnen martensitischen Schicht umgeben. Die gehärtete darunter liegende Schicht enthielt Martensit, Restaustenit und Ferrit an den Graphitkugeln. Die Mikrohärtete erreichte 1000 HV₁₀₀ bis zu einer Tiefe von etwa 100 µm. Bis zu 500 µm Tiefe lag die Mikrohärtete bei etwa 850 HV₁₀₀. [74]. Bild 84 zeigt schematisch die durch die Laserbestrahlung beeinflussten Zonen in der Randschicht.

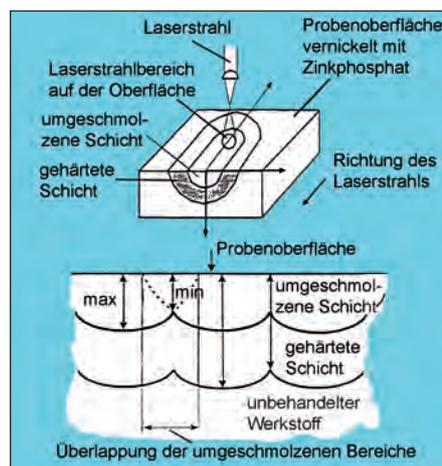


Bild 84: Schematische Darstellung des Laserstrahlumschmelzens und der beeinflussten Randschicht

Ein Randschichtumschmelzen kann auch so durchgeführt werden, dass ein kontrolliertes Liniennetzwerk aus weiß erstarrtem Gusseisen in der Randschicht erzeugt wird, eine Mosaikstruktur. Mit einem CO₂-Laser wurden bei einem Gusseisen mit Kugelgraphit der Sorte EN-GJS-400-12 umgeschmolzene Linien von 1,6 mm Breite erzeugt. Das Mikrogefüge der umgeschmolzenen Schicht enthielt Ledeburit und Martensit.

5.5.2 Randschicht-Umschmelz-Legieren

Randschicht-Oberflächen-Legieren ist ein Sammelbegriff für alle Verfahren zum Legieren einer Randschicht durch energieintensive kurzzeitige lokale Erwärmung auf Temperaturen oberhalb des Schmelzpunktes und Abkühlen (Erstarren) durch intensive Wärmeabfuhr in die benachbarten Werkstoffbereiche. Die Zufuhr von Legierungselementen erfolgt während des Schmelzens oder durch vorheriges Aufbringen von Schichten.

Bei einem Gusseisen mit Kugelgraphit mit 3,4 % C; 2,8 % Si; 0,3 % Mn und 0,06 % Mg wurde mit einem CW-YAG-Laser in der Randschicht beim Umschmelzen mit Chrom oder Wolfram oberflächenlegiert [75]. Die Laserleistung lag bei 500 bis 700 W, der Laserstrahldurchmesser bei 2 mm an der Oberfläche, die Vorschubgeschwindigkeit bei 1 bis 5 mm/s. Die Gusseisenoberfläche wurde vorher mit dem Metallpulver beschichtet oder das Legierungselement wurde elektrolytisch aufgetragen. Durch das Randschicht-Umschmelz-Legieren mit Chrom entstanden in der Randschicht Chromcarbid (Cr₇C₃). Die Oberflächenmikrohärte betrug mindestens 950 HV₀₁. Beim Oberflächenlegieren mit Wolfram enthielt die Randschicht Wolframcarbid ((Fe,W)₆C₆) und Fe₃C). Als Oberflächenmikrohärte wurden 1300 HV₀₁ erreicht. Diese Carbide lagen in einer metallischen Grundmasse aus Martensit und Restaustenit.

Beim Randschicht-Umschmelz-Legieren mit einem 2000-W-CW-CO₂-Laser wurden in ein perlitisches Gusseisen mit Kugelgraphit mit 3,62 % C; 2,32 % Si; 0,36 % Mn; 0,57 % Cu; 0,036 % Mg und 0,030 % Ce Wolframcarbideilchen eingebracht [76]. Die Gusseisenoberfläche wurde mit Wolframcarbidpulver mit einem organischen Bindemittel beschichtet. Die Pulverteilchen hatten eine Korngröße von < 0,071 mm. Die Laserleistung wurde mit 1500 und 1800 W eingestellt. Der Laserstrahldurchmesser lag bei 4 mm, die Vorschubgeschwindigkeit bei 2,5 bis 15 mm/s. Nach der Laserstrahlbehandlung ergab sich folgender Schichtaufbau: Eine Schicht mit Wolframcarbid und einem Wolframgehalt bis zu 17 %, eine wärmebehandelte Übergangsschicht mit Austenit und Ledeburit. Die Tiefe der aufgeschmolzenen Schicht lag bei 0,4 bis 0,8 mm. Die Oberflächenmikrohärte erreichte 1500 HV.

5.6 Oberflächenverformen

Zum Verformen der Oberflächen von Gussteilen kommen mehrere Verfahren zur Anwendung, die zum Einstellen bestimmter Eigenschaften zum Einsatz kommen.

Das **Festwalzen** ist eine örtliche plastische Verformung durch Querwalzen mit dem Ziel, in der Randschicht des Gussteils Druckeigenspannungen zu erzeugen.

Das **Glattwalzen** ist ein fortschreitendes Druckumformen der oberflächennahen Bereiche eines Gussteils mit dem Ziel, die Oberflächenrauheit zu verringern. Gleichzeitig findet auch eine Kaltverfestigung der Randschicht statt.

Unter **Kugelstrahlen** versteht man das Strahlen metallischer Werkstoffe mit kugeligem Strahlmittel (Stahlkugeln) zum Erzeugen von Druckeigenspannungen in der Randschicht von Gussteilen, um die Schwingfestigkeit von gegossenen Bauteilen zu verbessern.

5.6.1 Festwalzen/Glattwalzen

Bei Untersuchungen zum Festwalzen von zwischenstufenvergütetem Gusseisen mit Kugelgraphit mit einer Zugfestigkeit von 1000 N/mm² wurden zylindrische Proben mit einem Einrollenwalzdorn bei einer Drehzahl von 355 Umdrehungen/min und einem Vorschub von 0,19 mm je Umdrehung auf einer Zugspindeldrehmaschine bearbeitet. Die Walzkraft wurde mit 1500, 2000, 2500 und 3000 N festgelegt. Im **Bild 85** ist die mittlere Rautiefe R_{tm} in Abhängigkeit von der Walzkraft dargestellt. Die mittlere Rautiefe sinkt zunächst mit zunehmender Walzkraft stark ab, durchläuft ein Minimum und steigt dann wieder stark an. Die Verringerung der Rautiefe bis zu einem Minimalwert von 4 µm ist auf eine zunehmende Glättung des Oberflächenfeinprofils zurückzuführen. Der anschließende Anstieg der Rautiefe hat eine Zerstörung der Randschicht als Ursache. Durch Mi-

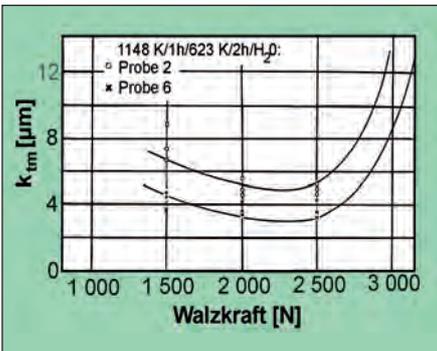


Bild 85: Mittlere Rautiefe in Abhängigkeit von der Walzkraft
Ausgangsrautiefe:
Probe 2: 30,2; 29,6; 22,5; Dmr. 27,43 µm
Probe 6: 12,5; 16,5; 15,5; Dmr. 14,83 µm
Probe 6 (3000 N): 14,0; 15,6; 19,2 µm



Bild 86: Kurbelwellen aus höherfestem GJS für PKWs der oberen Mittelklasse, Gewicht 16 und 18 kg (Bild: ZGV, Düsseldorf)

krohärtemessungen als Funktion des Randabstands wurden eine Verfestigungstiefe von 550 µm und ein Verfestigungsgrad von 1,45 errechnet. Der maximale Wert der Mikrohärtigkeit in unmittelbarer Randnähe lag bei 1400.

Im **Bild 87** wird die Schwingfestigkeit von Kurbelwellen aus Gusseisen mit Kugelgraphit der Sorte EN-GJS-700-2 gezeigt, bei denen die Übergangsradien entweder nitriert oder festgewalzt wurden [78]. Deutlich erkennbar ist, dass die Schwingfestigkeit durch Nitrieren spürbar verbessert werden kann. Durch Festwalzen kann demgegenüber eine noch wesentlich höhere Schwingfestigkeit erreicht werden.

Bei Untersuchungen zum Glattwalzen von zwischenstufenvergütetem Gusseisen mit Kugelgraphit [79] wurden zylindrische Stäbe nach der Wärmebehandlung überschleifen und auf einer Zugspindeldrehmaschine mit Diamantwerkzeugen geglättet. Bei diesen Untersuchungen wurden die Glättspannung, die Anzahl der Glättdurchgänge und der Radius des Glättdiamanten variiert. Die Drehzahl und der Vorschub blieben konstant. Im **Bild 88**, das die Mikrohärtigkeit in Abhängigkeit vom Randabstand zeigt, ist die durch das Diamantglätten erzielte Verfestigung der Randschicht deutlich sichtbar. Die Tiefe der verfestigten Randschicht erreicht dabei 400 bis 500 µm. Die Mikrohärtigkeit am Rand steigt von etwa 400 auf rund 700 Härteeinheiten. Bei den durchgeführten Glättversuchen konnte auch eine Verformung der Graphitkugeln in der Randschicht beobachtet werden. Durch Auswertung dieser Graphitkugelverformung konnte auf einen Umformgrad von 40 in der Randschicht geschlossen werden.

Bei Untersuchungen zum Erhöhen der Schwingfestigkeit von Bauteilen aus Gusseisen mit Kugelgraphit wurden an abgestuften Wellen aus EN-GJS-400-18, EN-GJS-600-3, EN-GJS-800-2 (vergütet) und EN-GJS-900-2 (zwischenstufenvergütet) die Biegewechsel- und die Biegeschwellig-

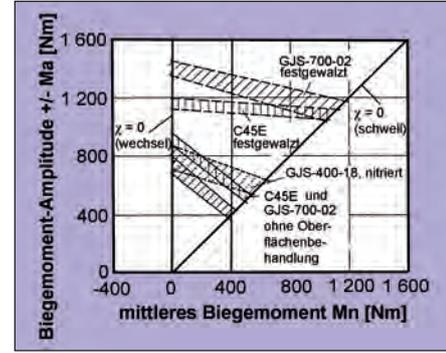


Bild 87: Schwingfestigkeit von Kurbelwellen aus Gusseisen mit Kugelgraphit ohne Randschichtbehandlung, nitriert und festgewalzt

festigkeit die Übergangsradien festgewalzt. Die Ergebnisse (**Bild 89**) [80] wurden mit den Schwingfestigkeit von Proben mit gedrehten Übergangsradien verglichen. Durch das Festwalzen der Übergangsradien konnten die Dauerfestigkeit und die Betriebsfestigkeit wesentlich erhöht werden.

Schwingfestigkeitsuntersuchungen (Zeit-, Dauer- und Betriebsfestigkeitskennwerte bei Wechsel- und Schwellbeanspruchung) an Proben aus EN-GJS-400-15, EN-GJS-700-2 und EN-GJS-1000-5 mit geschliffenen, festgewalzten, induktionsgehärteten und induktiv gehärteten, angelassenen und fest gewalzten Übergangsradien zeigten, dass durch die genannten Randschichtbehandlungen die Schwingfestigkeiten deutlich erhöht werden konnten [81].

Auch das Festwalzen, das Kalibrieren und das Kugeldrücken an Querbohrungen bei abgesetzten Wellen aus Gusseisen mit Kugelgraphit EN-GJS-700-2 führen zu einer Erhöhung der Torsionsschwingfestigkeit bei wechselnder Beanspruchung. Beim Kalibrieren wurde eine Stahlkugel durch die gesamte Bohrung gedrückt. Beim Kugeldrücken wurde eine Stahlkugel beidseitig in die Bohrungsansenkung gedrückt. Die relative Steigerung der Torsionswechsel- und Betriebsfestigkeit ist im **Bild 90** [82] dargestellt. Die wirksamste Maßnahme war dabei das Kalibrieren.

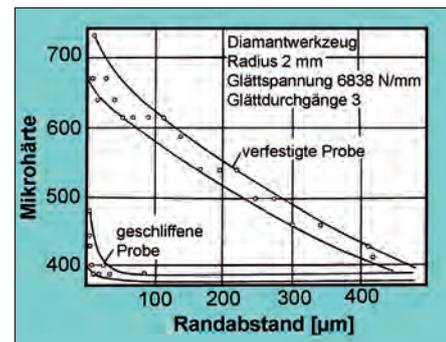


Bild 88: Abhängigkeit der Mikrohärtigkeit vom Randabstand einer Probe aus ADI nach dem Schleifen und dem Diamantglätten

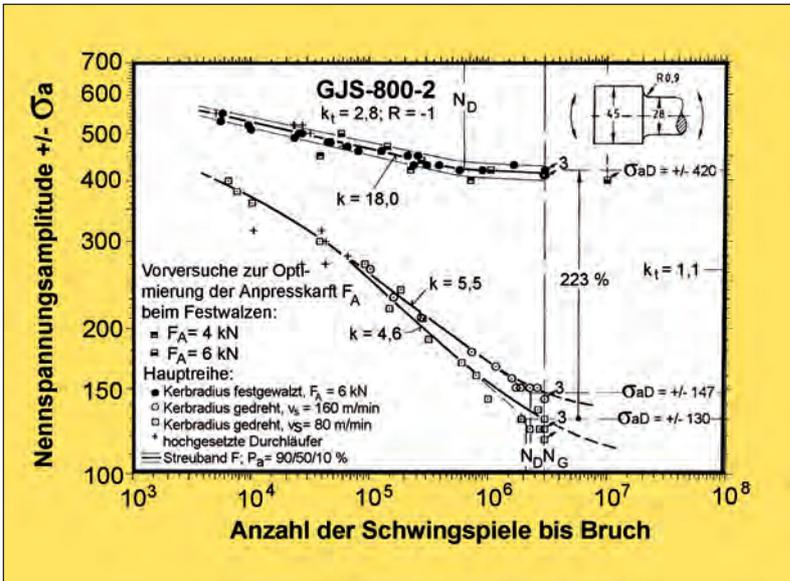


Bild 89: Wöhlerlinie für abgesetzte Wellen aus EN-GJS-600-3 unter Biegung im gedrehten Zustand und mit fest gewalzten Übergangsradien

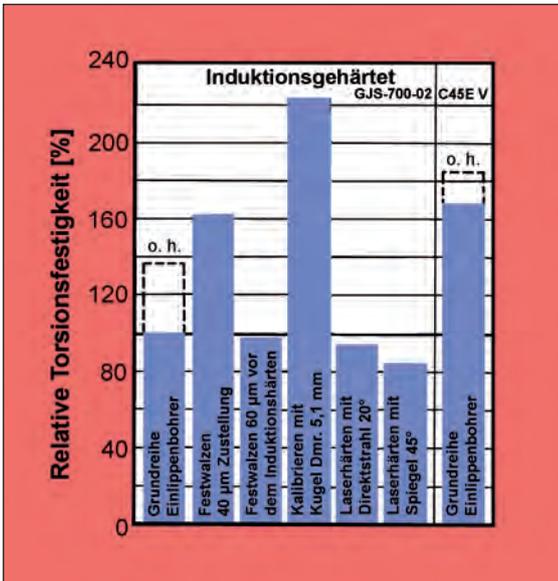


Bild 90: Relative Steigerung der Torsionswechselfestigkeit von induktionsgehärteten Bauteil ähnlichen Proben aus EN-GJS-700-2 und dem Stahl C45E V

5.6.2 Kugelstrahlen

An Proben aus zwischenstufenvergütetem Gusseisen mit Kugelgraphit (ADI) mit einer Zugfestigkeit von 1135 N/mm² wurde das Biegewechselverhalten an glatten Proben nach einem Kugelstrahlen und/oder einem Festwalzen ermittelt. Beim Kugelstrahlen bilden sich in der Randschicht hohe Druckeigenspannungen auf.

5.6.3 Gewinderollen

Die gute Umformbarkeit des Gusseisens mit Kugelgraphit erlaubt auch das Gewinderollen. Am Beispiel eines Brückenfittings wurde an der Spindel aus EN-GJS-400-18 ein Trapezgewinde M 48 x 4 mit einer Gewindelänge von 180 mm durch Gewinderollen hergestellt [83].

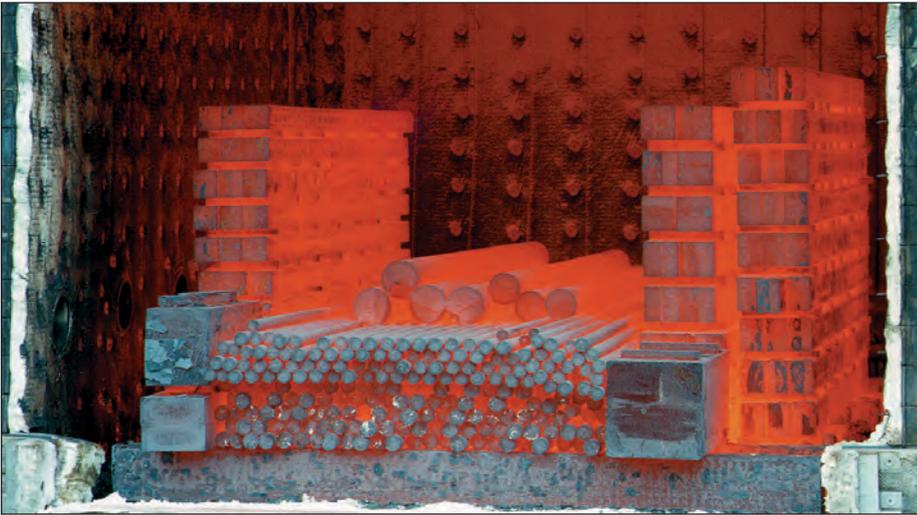


Bild 91: Blick in den Wärmebehandlungsofen mit etwa 50 t Gussteilen aus GJS beim Glühen auf 950 °C (Bild: Gontermann-Peipers, Siegen)



Bild 92: Auch Strang- und Schleudergussteile werden wärmebehandelt, aber auch die im Bild gezeigten Kokillengussteile (Blöcke und Büchsen) aus EN-GJS-600-3 (Bild: Gontermann-Peipers, Siegen)



Bild 93: Gehäuse für Schnellspulwickler aus EN-GJS-500-7, Gewicht 236 kg (Bild: Olsberg Hermann Everken, Olsberg)

6 Schweißen

6.1 Einführung

Gusseisen ist schweißbar! Voraussetzung hierfür ist jedoch eine fachgerechte und sorgfältige Durchführung der Schweißungen. Dieser Technologiefortschritt ist der Erfolg einer gezielten Weiterentwicklung der Schweißverfahren und deren Werkstoff spezifischer Parameteroptimierung, der Schweißtechnologie und auch der Anpassung der Schweißzusatzstoffe an die Anforderungen der zu verschweißenden Gusswerkstoffe und Qualitätsansprüche der Kunden. Grundvoraussetzung für die Akzeptanz des Kunden ist in jedem Fall, dass die durchgeführten Schweißungen prozesssicher den jeweils erwarteten Qualitätsansprüchen an das Gussteil oder die Schweißkonstruktion hinsichtlich der zu vereinbarenden Merkmale der Schweißung beziehungsweise der Schweißverbindung genügen müssen. Dieser Fortschritt des Standes der Technik beim Schweißen von Gusseisenwerkstoffen wurde zwischenzeitlich auch in das internationale Normenwerk übernommen. Über den Stand der Technik beim Schmelzschweißen von Gusseisen mit Kugelgraphit gibt **Tabelle 2** einen Überblick.

Die Wahl des Schweißverfahrens und der Randbedingungen erfolgt zumeist unter Berücksichtigung der zu erfüllenden Anforderungsklassenspezifikation und der gewählten Bewertungsgruppe nach **DIN EN 1011-8**. Nach dieser Norm lassen sich folgende drei Anwendungsfälle des Schweißens unterscheiden: Das **Fertigungsschweißen** ist ein Produktionsschweißen, das durchgeführt wird, um die ver-

einbarte Qualität des Gussstückes sicherzustellen. Das **Verbindungsschweißen** ist dagegen ein Produktionsschweißen, bei dem die Bauteile miteinander verbunden werden, um eine integrale Einheit zu bilden. Sowohl das Fertigungs- wie auch das Verbindungsschweißen erfolgen im Verlauf des Produktionsprozesses und werden deshalb unter dem Oberbegriff **Produktionsschweißen** zusammengefasst. Das Produktionsschweißen umfasst alle während der Herstellung vor der endgültigen Lieferung an den Endverbraucher durchgeführten Schweißungen.

Das **Reparaturschweißen** umfasst jegliches Schweißen, welches nach der endgültigen Ablieferung an den Endverbraucher durchgeführt wird, um ein gebrochenes oder auch auf andere Weise nicht mehr funktionstüchtiges Gussstück wieder in den gebrauchsfähigen Zustand zu versetzen (**Bild 94**).

Zwei weitere Arten des Gusseisenschweißens sollen hier nur der Vollständigkeit wegen aufgeführt werden. In der Praxis haben sie mit dem schweißtechnologischen Fortschritt des Gusseisenschweißens an Bedeutung verloren. Sie können aber auch in Zukunft sowohl in der Gießerei oder beim Reparaturschweißen erfolgreich eingesetzt werden.

Unter **Gießschweißen** wird das Schweißen durch Gießen von flüssigem Metall in eine speziell vorbereitete Vertiefung (Rille oder Furche) an einem Gussstück verstanden.

Das **Flüssigmetallschweißen** ist ein spezielles Gießschweißverfahren mit zusätzlicher Unterstützung durch einen Lichtbogen-Schmelzschweißprozess.

6.2 Metallurgie

Die beim Schweißen auftretenden Temperaturen lösen den vorliegenden Graphit in der metallischen Matrix des Gusseisens. Abhängig von Kohlenstoffsättigung und Abkühlungsgeschwindigkeit bildet sich dann entweder Martensit oder in aufgeschmolzenen Bereichen in kürzester Zeit (zum Beispiel bei Schweißzeiten ≤ 40 ms) Ledeburit. Die Bildung von Ledeburit kann damit praktisch nicht verhindert werden. Beide, Martensit und Ledeburit, sind sehr harte und spröde Gefügebestandteile, die die Verformung unter Belastung behindern, die Bearbeitung der Schweißstelle erschweren, und die Bildung von Schweißrissen fördern, sofern nicht geeignete Gegenmaßnahmen ergriffen werden. Das heißt, die werkstoffkundlichen Zusammenhänge beim Schweißen müssen in Fertigungsparameter umgesetzt werden, die ein gezieltes und prozesssicheres Einstellen der Schweißnahteigenschaften gestatten [84]. Als wesentliche Schweißparameter/Steuergrößen stehen zur Verfügung:

- **Vorwärmtemperatur** (Um Martensitbildung mit Sicherheit zu vermeiden, sollte die Schweißstelle auf Temperaturen oberhalb der werkstoffabhängigen Martensitstartlinie vorgewärmt werden. Ledeburitbildung lässt sich durch Vorwärmen nicht vermeiden).
- **Wärmeeinbringen** (Dieses sollte während des Schweißens möglichst klein sein).
- **Schweißgeschwindigkeit** (Sie ist vom angewendeten Schweißverfahren und von der chemischen Zusammensetzung des zu verschweißenden Werkstoffes abhängig).
- **Abkühlungsverlauf** (Generell kann der erforderliche Abkühlungsverlauf durch das bekannte ZTU-Schaubild des zu



Bild 94: Reparaturschweißen eines Großgussteils im vorgewärmten Zustand im Wärmebehandlungsofen (Bild: C. Hahn, Remscheid)

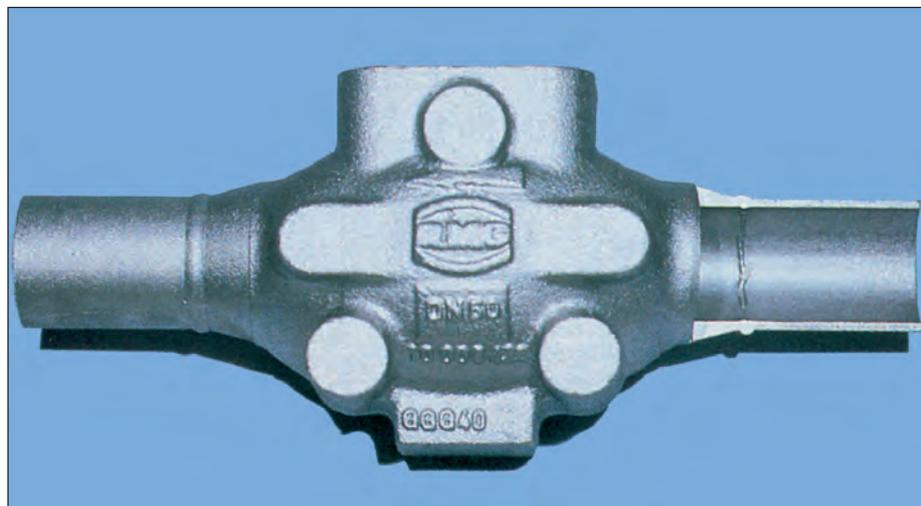


Bild 95: Verbindungsgeschweißtes Ventilgehäuse aus EN-GJS-400-15 mit Rohrabschnitten aus Stahl beidseitig im MAG-Verfahren vorgeschweißt (Bild: ZGV: Düsseldorf)

Tabelle 2: Auszug aus DIN EN 1011-8 – Tabelle B modifiziert: Empfehlungen für das Schmelzschweißen von Gusseisenwerkstoffen mit artgleichem, artähnlichem und artfremdem Zusatzwerkstoff

Verfahren	Methode	Schweißen von Gussstücken aus Gusseisen mit artgleichen oder artähnlichen Schweißzusätzen	Schweißen von Gussstücken aus Gusseisen mit artfremdem Schweißzusatz
Nahtvorbereitung	Vorbereitung	Gusshaut von der Schweißfläche des Gussstücks und dem angrenzenden Bereich entfernen und diese reinigen.	
	- thermisch	Plasmaschmelzschneiden; Pulverbrennschneiden (bedingt Lichtbogenschneiden, autogenes Brennschneiden nicht geeignet)	
	- mechanisch	mechanisches Bearbeiten, Schleifen, Ausmeißeln	
Verwendung von Schweißunterlagen		Graphithaltiger Werkstoff, Lehm, Keramik, Gusseisen mit Kugelgraphit, unlegierter Stahl	
Empfehlungen für die thermische Behandlung (Schweißen örtlicher Bereiche oder des gesamten Gussstücks)	1) Vorwärmen	Schweißen mit artgleichen Schweißzusätzen: $T_p = 550\text{ °C bis }700\text{ °C}$ (je nach Material und/oder Verfahren) Schweißen mit artähnlichen Schweißzusätzen: $T_p = 250\text{ °C bis }550\text{ °C}$ Maximale Erwärmungsgeschwindigkeit (je nach Gussteil oder Bauteil)	T_p max. 300 °C
	2) Gussstücktemperatur beim Schweißen	Schweißen mit artgleichen Schweißzusätzen: außerhalb der Schweißfläche $\geq 450\text{ °C}$ Schweißen mit artähnlichen Schweißzusätzen: außerhalb der Schweißfläche $\geq 250\text{ °C}$	Zwischenlagentemperatur $T_i = T_p + 50\text{ K}$
	3) Abkühlgeschwindigkeit	Je nach Komplexität des Gussteils oder Bauteils Von $450\text{ °C bis }150\text{ °C} \leq 50\text{ K/h}$ bei spannungsempfindlichen Gussstücken	In ruhender Luft
Wärmenachbehandlung	Separate Wärmebehandlung oder Nutzung der Restwärme beim Schweißen	Je nach Grundwerkstoff, Größe und Form des Gussstücks und anderen Anforderungen kann jedes Wärmebehandlungsverfahren angewendet werden.	
Verwendung von Zusatzwerkstoffen	Gasschweißen mit Sauerstoff-Acetylen-Flamme (311)	GJS-Stab	Metallpulver
	Lichtbogenhandschweißen (111)	GJS-Stabelektrode, umhüllt oder nicht umhüllt, Umhüllte Stabelektrode aus Stahl, wahlweise hüllenlegiert oder Umhüllung ohne Legierung, Umhüllter Schweißstab.	Umhüllter Schweißstab nach EN ISO 1071
	Metall-Schutzgasschweißen (13)	Drahtelektroden, unlegiert oder legiert, nur für Zwischenlagentemperatur $\leq 300\text{ °C}$ (um die Schutzgaswirkung aufrechtzuerhalten).	Massivdrahtelektroden, umhüllte Drahtelektroden, nach EN ISO 1071
	WIG-Schweißen (141)	Schweißstäbe, Fülldrähte nur für Zwischenlagentemperaturen $\leq 300\text{ °C}$ (um die Schutzgaswirkung aufrechtzuerhalten).	Massivstäbe, Schweißstäbe, Massivdraht, Fülldraht, nach EN ISO 1071
	Metall-Lichtbogenschweißen mit Fülldrahtelektrode ohne Schutzgas (114)	Fülldraht: Schweißgut (GJS)	Umhüllte Drahtelektrode, nach EN ISO 1071
	Gießschweißen	Schmelzgut GJS	
	Gießschmelzschweißen	Wie Gießschweißen, jedoch mit zusätzlicher Verwendung von Elektroden	
	Plasmaschweißen (15)	Mit wenig oder ohne Zusatzwerkstoff	
Verwendung von Flussmitteln		Legiert oder unlegiert, kann zur Verbesserung der Schweißbedingungen verwendet werden.	

verschweißenden Werkstoffs bestimmt werden. So kann beispielsweise die Martensitbildung vor ihrer Entstehung durch kontinuierliche gesteuerte Ab-

kühlung zum Beispiel in der Schweißmaschine (siehe auch 6.4.4.1) durch den entsprechenden verzögerten Abkühlungsverlauf entsprechend ZTU-Dia-

gramm verhindert werden. Bei manuellen Schweißverfahren ist die Intensität der Vorwärmung das Maß für einen verzögerten Abkühlungsverlauf).

- **Schweißverfahren/Schweißparameter** (bei automatisierten Verfahren),
- **Schweißzusatzwerkstoff** (Die Pressschweißverfahren (siehe Abschnitt 6.4.4.) arbeiten völlig ohne Zusatzwerkstoff, bei den manuellen oder mechanisierten Lichtbogenverfahren richtet sich der Zusatzwerkstoff nach den Anforderungen an die Schweißstelle oder Schweißverbindung (siehe Schweißen mit artgleichem, Abschnitt 6.4.1, artähnlichem, Abschnitt 6.4.2, oder artfremdem, Abschnitt 6.4.3, Zusatzwerkstoff)).

Diese Steuergrößen sind jedoch nicht in jedem Fall voneinander unabhängig und sie müssen je nach anzuwendendem Schweißverfahren aufeinander abgestimmt werden.

Aber auch nach dem Schweißen können noch Korrekturen am martensitischen Schweißgefüge vorgenommen werden, da Martensit bereits in kurzer Zeit und bei relativ niedrigen Anlasstemperaturen Anteile des in übersättigter Austenitlösung vorliegenden Kohlenstoffs ausscheidet und zähes Vergütungsgefüge bildet. Die Anlasstemperatur bei der thermischen Nachbehandlung (Zerstören des Martensits) richtet sich dann nach dem gewünschten Anlazzustand und kann von ferritischem Grundgefüge bis zu Vergütungsgefüge reichen.

Ledeburit in der Verbindungszone kann nur durch ein nachträgliches Langzeit-Hochtemperatur-Glühen (Graphitisierungsglühen über mehrere Stunden je nach Siliciumgehalt bei Temperaturen um 900 °C) zum Zerfall gebracht werden, was meistens an wirtschaftliche Grenzen stößt, oder es kann aber auch bei Anwendung eines geeigneten (Press-) Schweißverfahrens durch einen Stauchvorgang am Ende des Schweißprozesses aus der Verbindungszone in einen Wulst gepresst werden.

6.3. Schweißeignung

Entsprechend dem Stand der Technik sind seit dem Jahr 2000 eine Reihe von graphitischen Gusseisensorten in die Liste der schweißgeeigneten Werkstoffe aufgenommen worden mit dem Ziel, Gruppen mit vergleichbaren kennzeichnenden Eigenschaften zu schaffen. Es handelt sich hierbei um einen technischen Bericht, herausgegeben unter der Bezeichnung **CEN ISO/TR 15608** [85]. Berücksichtigung fand dabei die Tatsache, dass bei allen unlegierten graphitischen Gusseisenwerkstoffen die Schweißeignung in erster Linie von der Menge an verspröden Gefügebestandteilen (zum Beispiel Perlit) sowie der Graphitform und ferner der Anzahl der Graphitpartikel im Bereich der Schweißstelle abhängig ist.

6.4 Geeignete Schweißverfahren

6.4.1 Schweißen mit artgleichem Zusatzwerkstoff

Gemäß der normativen Definition (**DIN EN 1011-8**) [86] wird ein Schweißgut erzeugt, das den gleichen Mikrogefügetyp wie der Grundwerkstoff aufweist. In diesem Fall ist darunter ein Matrixgefüge aus Eisen mit Graphitausscheidungen zu verstehen (**Bild 96**). Um die Bildung von Härtegefügen (wie Bainit, Martensit und Ledeburit) zu vermeiden, muss das ganze Gussteil, in seltenen Fällen nur die Schweißstelle, ausreichend vorgewärmt werden. Das Vorwärmen wirkt im Sinne eines verzögerten Abkühlens. Für das Vorwärmen schwanken die Temperaturen zwischen 400 und 700 °C [87, 88].

Während des Schweißens muss die Arbeitstemperatur überwacht und sollte in den in **Tabelle 2** genannten Grenzen gehalten werden. Diese erhöhte Arbeitstemperatur in Verbindung mit dem kleinen Erstarrungsintervall von Gusseisen mit Kugelgraphit bildet ein deutlich höheres Risiko, dass das Schweißbad durchfällt. In diesem Fall muss mit einer Schweißbadsicherung gearbeitet werden. Wenn erforderlich, kann direkt aus der Schweißwärme eine Carbidzerfallsglühung oder eine perlitisierende Wärmebehandlung angeschlossen werden. Zur Reduzierung von Resteigenspannungen erfolgt ein hinreichend langsames Abkühlen des Gussteils.

Für das artgleiche Schweißen werden häufig das Metall-Lichtbogenschweißen mit Fülldrahtelektrode ohne Gasschutz, das Lichtbogenhandschweißen mit Stabelektroden und das Gasschweißen mit Sauerstoff-Acetylen-Flamme angewendet. Es wird mit möglichst großem Wärmeeinbringen gearbeitet. Die Auswahl geeigneter Schweißzusatzwerkstoffe erfolgt vor

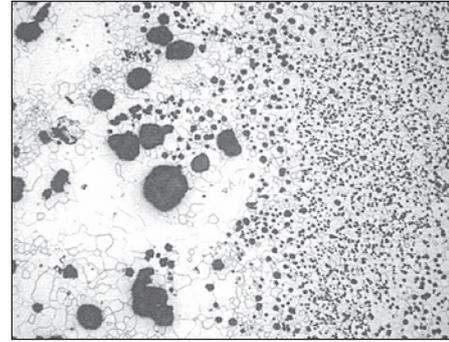


Bild 96: Schmelzlinie einer artgleichen Schweißung mit C-Si-Zusatzwerkstoff (rechts) an einem Gussteil aus EN-GJS-400-15 (links) (Bild: Siempelkamp, Krefeld)

nehmlich unter Anwendung der Norm **DIN EN ISO 1071** [90].

Beim **Gasschweißen** mit Sauerstoff-Acetylen-Flamme werden große Brenner eingesetzt, wobei artgleiche Schweißstäbe bei neutraler bis leicht reduzierender Flammeneinstellung verarbeitet werden. Flussmittel, die gegen Oxidation schützen und die beim Vorwärmen gebildeten Oxide wieder auflösen sollen, sind entweder als Nut in die Schweißstäbe eingelegt, als Umhüllung vorhanden oder werden getrennt zugegeben. Eigenschaftswerte von Gasschweißungen mit einem 5%-Nickel-Zusatzstab sind in **Tabelle 3** enthalten. Durch Lösungsglühen (3 h/900 °C + 16 h/700 °C) lassen sich speziell die Bruchdehnungswerte im Schweißgut auf 8,5 bis 12 % erhöhen [88] (**Bild 97**).

Damit die Schweißfuge möglichst schnell gefüllt ist und die Vorwärmtemperatur möglichst konstant gehalten werden kann, wird beim **Lichtbogenhandschweißen** mit Stabelektroden großen Durchmessers und entsprechend hohen Stromstärken (bis 1 500 A) gearbeitet. Die verwendeten Stabelektroden können aus einem Kern-

Tabelle 3: Festigkeitseigenschaften von Stumpfnähten an perlitischem Gusseisen mit Kugelgraphit, gasschweißst mit einem 5 %-Nickel-Zusatzstab [89]

Dicke des Gussteils [mm]	Nahtform	Probenquerschnitt [mm x mm]	Festigkeitseigenschaften			Bruchlage
			Zugfestigkeit [N/mm ²]	0,2%-Dehngrenze [N/mm ²]	Bruchdehnung (l ₀ =2") [%]	
13	V-Naht, 90° Öffnungswinkel	25,4 x 11,4	735	528	2,5	Nahtmitte
			732	630	2,5	Nahtmitte
			669	597	2,0	Nahtkante
25	X-Naht, 90° Öffnungswinkel	25,4 x 22,2	592	569	2,0	Nahtkante
			583	488	2,5	Nahtkante
			633	576	2,5	Nahtkante
51	X-Naht, 90° Öffnungswinkel	25,4 x 28,7 (Probenmitte)	602		3,0	Nahtmitte
		Dmr. 12,8 (Probenoberfläche)	657 651	567 559	1,5 1,5	Nahtmitte Nahtmitte

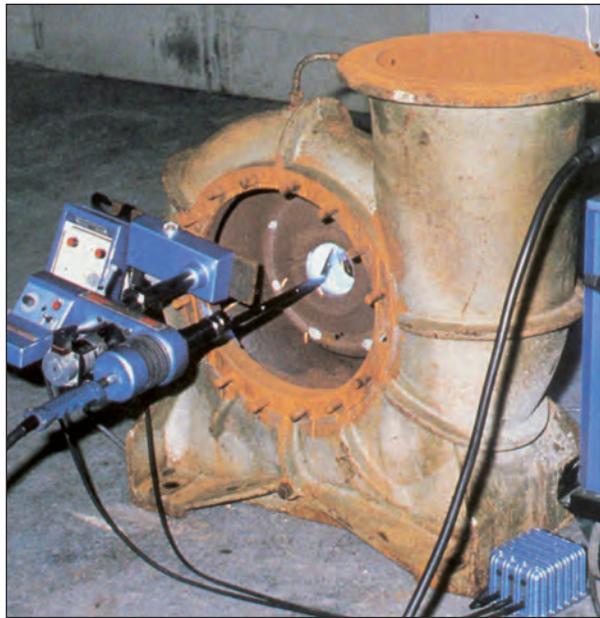


Bild 97: Fertigungsschweißen des Lagersitzes eines Pumpengehäuses mit einer Massivdraht-Elektrode auf NiFe-Basis (Bild: ZGV, Düsseldorf)

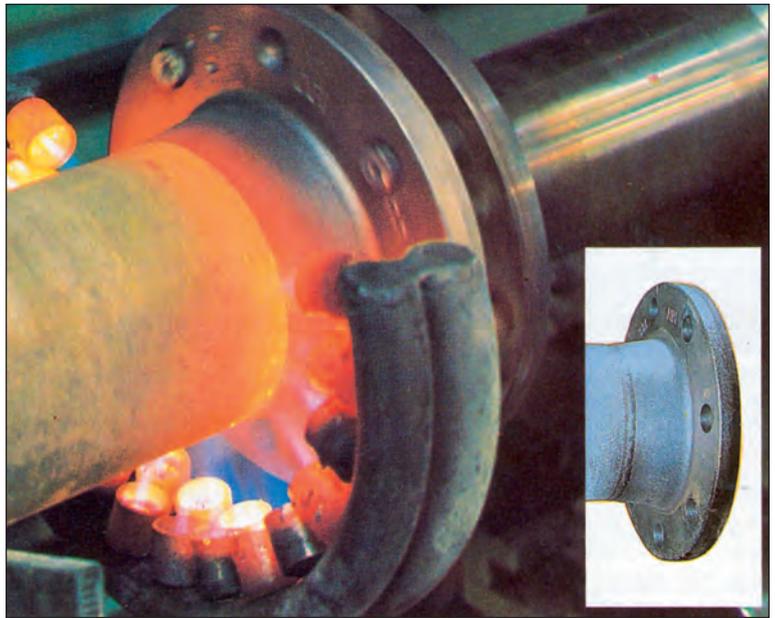


Bild 98: Verbindungsschweißen eines Schleudergussrohres und eines Flansches aus GJS durch Plasmaschweißen (Bild: ZGV, Düsseldorf)

stab aus Gusseisen mit Kugelgraphit oder Stahl bestehen. Im letzten Fall werden Kohlenstoff und Silicium sowie die zur Kristallisation von kugeligem Graphit notwendigen Elemente, wie Magnesium, Cer oder Seltene Erden aus der Umhüllung zulegiert. Es können auch die vom Gas-schweißen her bekannten Stäbe aus Gusseisen mit Kugelgraphit eingesetzt werden. Da diese Stäbe im Lichtbogen dazu neigen, das zur Kugelgraphitbildung erforderliche Magnesium zu verdampfen und damit eine erhöhte Tendenz zur Graphitentartung besteht, werden bevorzugt die umhüllten oder hüllenlegierten Elektroden eingesetzt. Einen Überblick über die Anforderungen an die Schweißzusätze und den Aufbau der Schweißstäbe und Stabelektroden gibt [91].

Das **Metall-Lichtbogenschweißen** mit Fülldrahtelektrode gewinnt aus Wirtschaftlichkeitsgründen immer mehr an Bedeutung. Automatisierbarkeit, die hohe Schweißgutausbringung und umfangreiche Legierungsmöglichkeiten sind die Gründe für den zunehmenden Anteil dieses Verfahrens. Aufgrund der bei hohen Vorwärmtemperaturen entstehenden Thermik verzichtet man auf die Zuführung von Schutzgas und verwendet vorzugsweise selbstschützende Fülldrähte.

Das Unterpulver- und das Elektroschlackeschweißen mit Massiv- oder Fülldrähten sowie das Gieß- oder Gießschmelzschweißen werden besonders für das Reparaturschweißen großer Gussstücke eingesetzt.

Das Plasmaschweißen mit und ohne Zusatz wird weitgehend anwendungsbezogen, zum Beispiel für Rohrverbindungen (Bild 98), angewendet.

6.4.2 Schweißen mit artähnlichem Zusatzwerkstoff

Als artähnliche Schweißzusatzwerkstoffe gelten im Sinne der Norm **DIN EN 1011-8** Zusatzwerkstoffe, die ein reines Schweißgut mit einem Mikrogefüge wie bei Stahl, also in diesem Fall ohne Graphitausscheidungen, ergeben.

Vereinzelt wird über die Verwendung von Stahlelektroden berichtet [92]. Sollen hierbei Risse in der Schweißübergangszone vermieden werden, so müssen bei dem unter höheren Temperaturen abschmelzendem Stahlschweißgut die Schweißbedingungen in engen Grenzen gehalten werden. Zur Erlangung hochduktiler Schweißverbindungen muss jedoch der Martensit auf der Gusseisenseite durch Glühen beseitigt werden. Die erreichten Eigenschaften enthält **Tabelle 4**. Vorwärmtemperaturen von 250 bis 550 °C können die Martensitbildung nach dem Schweißen erheblich vermindern.

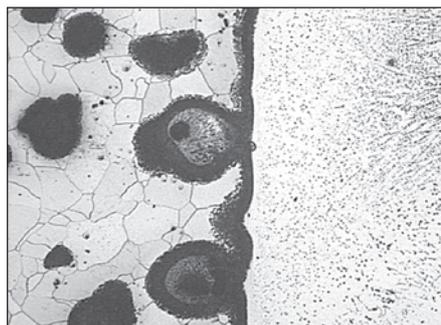


Bild 99: Schmelzlinie einer artfremden Schweißung mit Ni-Fe-Zusatzwerkstoff (rechts) an EN-GJS-400-15 (links)

6.4.3 Schweißen mit artfremdem Zusatzwerkstoff

Artfremde Schweißzusätze erzeugen definitionsgemäß ein reines Schweißgut, dessen Mikrogefüge anders ist als das des Grundwerkstoffes. Das heißt, es liegt in diesem Fall keine Eisenmatrix vor. Deshalb fällt als offensichtliches Unterscheidungsmerkmal zum artgleichen Schweißgut die Farbungleichheit zwischen Schweißgut und Grundwerkstoff als Folge des abgesetzten meist hochnickelhaltigen und somit austenitischen Schweißgutes auf (Bild 99).

Nickelhaltiges Schweißgut nimmt in der Aufmischungszone Eisen aus dem Grundwerkstoff auf und bildet Nickelmartensit. Diese Zone verfügt jedoch über ausreichende Zähigkeitseigenschaften, um die Verbindung nicht zu schwächen. Nickel kann zum Beispiel beim Schweißen im flüssigen Zustand über 6 % Kohlenstoff lösen. Dieser scheidet sich beim Erstarren in Form von kleinen Graphitsphärolithen aus, was sich in einem Abbau von Eigenspannungen als Folge der durch die Graphitausscheidung bewirkten Volumenzunahme auswirkt. Die Schweißung bleibt zäh. Sie vermag somit Spannungen als Folge von Gefügeumwandlungen und unterschiedlichen Temperaturverhältnissen im Schweißgut und auch Werkstück bestimmte Schweißspannungen durch Verformung abzubauen.

Durch Abhämmern des Schweißgutes im warmen Zustand können sogar Druckspannungen erzeugt werden, die die Gefahr von Schweißrestspannungen minimieren.

Tabelle 4: Eigenschaften von elektrischen Kaltschweißungen an EN-GJS-350-22 und EN-GJS-400-18 mit Stahlelektroden „Supratherm“, ferritisch gegläht nach dem Schweißen [92]

Zugfestigkeit (20)	R_m	352 - 450 N/mm ²
0,2%-Dehngrenze (20)	$R_{p0,2}$	230 - 331 N/mm ²
Härte (12)	HV ₁₀	169 - 198 Einheiten
Bruchdehnung (20)	A_5	10,5 - 30,0 %
Brucheinschnürung (20)	Z	
GJS Schweißgut		8,5 - 28,0 % 70 - 77 %
ISO-V-Kerbschlagarbeit Übergang (18)	A_v (ISO-V)	6 - 17 J
Schweißgut (6)		132 - 170 J
DVM-Kerbschlagarbeit Übergang (6)	A_v (DVM)	9 - 10 J
Schweißgut (6)		130 - 137 J
Umlauf-Biegewechselfestigkeit (16)	σ_{bw}	
Übergang		203 ± 32 N/mm ²
GJS-400-15		196 ± 4,35 N/mm ²
Zug-Schwellfestigkeit (9)	σ_{zS}	179 N/mm ²

(X) - Anzahl der Messwerte

Die Notwendigkeit des Vorwärmens ist im Gegensatz zum Schweißen mit artgleichen oder artähnlichen Zusatzwerkstoffen nicht erforderlich. Bei Schweißverfahren mit höherer Energiedichte, wie zum Beispiel das Metall-Schutzgasschweißen oder das Lichtbogenhandschweißen mit größeren Elektrodendurchmessern, wird bei komplizierten Gussteilen mit spannungstechnisch ungünstiger Schweißnahtlage auch für nickelhaltiges Schweißgut ein Vorwärmen auf 100 bis 250 °C empfohlen. Der zusammenhängende Martensitsaum aufgrund des höheren spezifischen Wärmeeinbringens kann durch diese Maßnahme vermindert werden, nicht jedoch die Bildung von Nickelmartensit in der Verbindungszone (**Bild 100a**)

sowie von normalerweise inselförmigem Ledeburit um die Graphitsphärolithen (**Bild 100b**). Je größer das Wärmeeinbringen ist, umso größer werden folglich die Ledeburitinseln, die sich im Extremfall zu einem zusammenhängenden Ledeburitsaum ausweiten können. Da Ledeburit praktisch keine Verformbarkeit aufweist und außerdem erst bei höheren Glüh-temperaturen und längeren Glühzeiten zerfällt, sollte beim Schweißen von Gusseisen mit Kugelgraphit unter Verwendung von artfremdem Schweißzusatz auf möglichst geringes Wärmeeinbringen geachtet werden. Bei Mehrlagenschweißungen können die oberen Lagen als Glühbehandlung für die unteren Lagen wirken (**Bild 100c**).

Gusseisen mit Kugelgraphit mit ferritischem Gefüge kann problemloser als perlitisches ohne Vorwärmen geschweißt werden, da bei Ferrit der für die Härtung maßgebende Kohlenstoff des Austenits erst aus den Graphitkugeln zurückgelöst werden muss. Der Zeitbedarf für diesen thermodynamischen Vorgang erhöht damit die zulässige Streckenenergie.

Vorzugsweise angewendet wird das Lichtbogenhandschweißen mit umhüllten Stabelektroden nach **DIN EN ISO 1071** auf Rein-Nickel- oder Nickel-Eisen-Basis. Die Eigenschaften solcher Schweißungen mit Ni-Fe-Elektroden für GJS-/GJS-Verbindungen enthält **Tabelle 5**, die für GJS/Stahl-Verbindungen die **Tabelle 6**. Für bestimmte Anwendungsbereiche hat sich der Einsatz von Ni-Cu-, Cu-Al- und Cu-Sn-Legierungen bewährt.

Die Schweißparameter müssen so gewählt werden, dass eine schmale Wärmeeinflusszone mit geringen Anteilen von Härtingsgefüge entsteht. Besonders ungünstig für den Eigenspannungszustand sind zusammenhängende martensitische und/oder ledeburitische Übergangs- und Wärmeeinflusszonen, während die inselförmige Anordnung spannungstechnisch weniger Probleme nach sich zieht. Das wird durch die nachfolgenden Maßnahmen erreicht [93]:

- Wahl von Elektroden mit möglichst kleinem Kerndurchmesser,
- Schweißstrom so niedrig wie möglich halten, um einen kurzen Lichtbogen einzustellen,

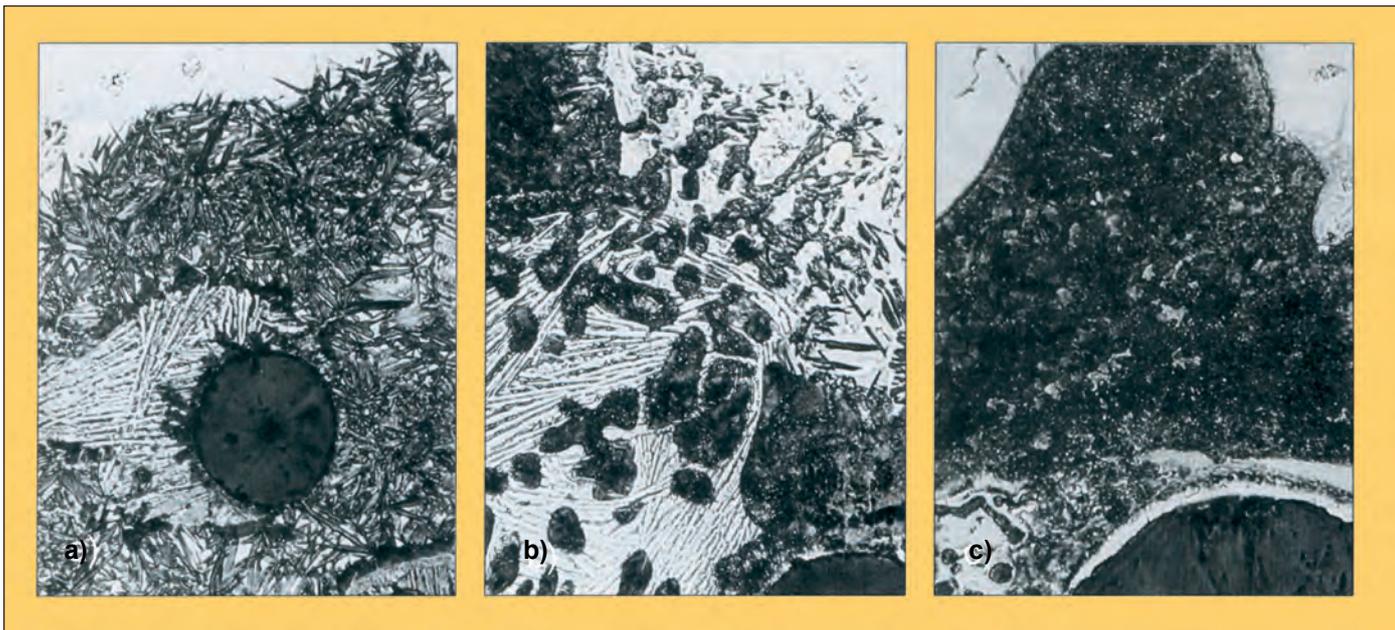


Bild 100: Gefügeausbildungen in Schweißungen von GJS

- a) Kaltschweißung von GJS mit NiCu-Elektrode (Gefüge: Übergangszone mit Ledeburit),
 b) Warmschweißung von GJS bei 350 °C mit einer FeNi-Elektrode (Gefüge: Übergangszone mit Ledeburit und Nickelmartensit),
 c) Mehrlagenschweißung (Gefüge: Aus den Ledeburitinseln des Ausgangsgefüges haben sich durch den Wärmeeinfluss kleine Sphärolithen mit Ferrithöfen gebildet).

Tabelle 5: Mechanische Eigenschaften von Stumpfnähten an Gusseisen mit Kugelgraphit, lichtbogengeschweißt, unter Verwendung einer Nickel-Eisen-Elektrode [89]

Ausgangsgefüge des Gussteils	Zustand	Zugfestigkeit [N/mm ²]	0,2%-Dehngrenze [N/mm ²]	Bruchdehnung (l ₀ =2") [%]	Brucheinschnürung [%]	Biegewinkel [Grad]	Schlagarbeit ¹ [J]	Gussteilhärte HV	Bruchlage
perlitisch	ungeschweißt	693	603	3	0	5; 10	1,5; 1,4; 1,5		
	geschweißt	578 466 573	535 502	2 1 1	4 3 3	14; 15	1,8; 1,8	265	Schmelzlinie Schmelzlinie/ Schweißgut Schmelzlinie
	geschweißt 3 h/900 °C + 16 h/700 °C	427 455 398	356 351 345	7 12 6	9 15 7	42; 44; 38	5,0; 5,5	165	Schweißgut Gussteil Schmelzlinie/ Schweißgut
ferritisch	ungeschweißt	480	334	18	23	78; 80	14,0; 14,0		
	geschweißt	480 447	397 376	4 7	16 11	28; 25 23; 14	1,9; 2,8	190	Gussteil Schweißgut
	geschweißt, 2 h/850 °C + 8 h/700 °C	477 469	354 274	6 7	3 3	40; 45	5,0; 4,6	165	Schmelzlinie/ Schweißgut Schmelzlinie/ Schweißgut

¹ Ungekerbte Probe, 10 x 10 x 55 mm

- mit kurzen Strichraupen von 20 bis 30 mm Länge und niedrigem Querschnitt schweißen,
- zwischen den einzelnen Raupenabschnitten ausreichende Abkühlzeit vorsehen,
- zwischen den einzelnen Lagen die Schweißrichtung wechseln,
- Elektrode steil führen.

In dickwandigem Gusseisen mit Kugelgraphit liegen aufgrund der geringeren Erstarrungsgeschwindigkeit eine geringere Anzahl größerer Graphitkugeln vor. Dieser Umstand verhindert wegen der größeren Kugelabstände ein Verbinden der Ledeburitinseln. Die Neigung zur Bildung einer duktilen Schmelzlinie ist somit größer als bei dünnwandigem Gusseisen und führt deshalb naturgemäß zu Schweißergebnissen mit geringer Spröbruchneigung auch ohne Wärmenachbehandlung.

Wegen der hohen Energiedichte des Schutzgas-Lichtbogens und der damit verbundenen schmalen Wärmeeinflusszone haben die Schutzgas-Schweißverfahren (WIG - Wolfram-Inert-Gas, MIG - Metall-Inert-Gas und MAG - Metall-Aktiv-Gas) besondere Vorteile beim artfremden Schweißen. Durch die Automatisierbarkeit der MIG/MAG-Verfahren wurde diesen der Anwendungsbereich beim Verbindungsschweißen erschlossen. Zunehmend findet das Verfahren Einsatz beim Auftragschweißen im Fertigungs- und Reparaturschweißbereich. Kurzlichtbogen- und Impulstechnik ermöglichen durch weiter

Tabelle 6: Mechanische Eigenschaften von Stumpfnähten zwischen Gusseisen mit Kugelgraphit und niedriggekohtem Baustahl, 25 mm dicke Platten, lichtbogenhandgeschweißt mit einer Nickel-Eisen-Elektrode [89]

Schweißbedingungen: X-Naht, 75° Öffnungswinkel; perlitische Platten vor dem Schweißen auf 200° vorgewärmt; Wurzelnaht, Elektrode Dmr. 3 mm, 120 A Wechselstrom; Probestücke für Zugversuch Dmr. 12,8 mm, quer zur Schweißnaht.

Ausgangsgefüge des Gussteils	Zugfestigkeit [N/mm ²]	0,2%-Dehngrenze [N/mm ²]	Bruchdehnung		Brucheinschnürung [%]	Bruchlage
			(l ₀ =1/2") [%]	(l ₀ =2") [%]		
perlitisch	444	294	6	4,5	10,0	Schweißgut
	488	346	52	17,0	54,0	Stahl
	482	269	58	17,5	56,0	Stahl
ferritisch	427	268	6	5,0	1,0	Schweißgut/ Gusseisen
	476	291	4	10,0	4,0	Schweißgut/ Gusseisen
	477	291	6	13,5	18,5	Gusseisen
	469	299		9,5	6,0	Schweißgut

reduziertes Wärmeeinbringen extrem schmale Wärmeeinflusszonen mit verbesserten mechanischen Eigenschaften, wie aus den **Tabellen 7** und **8** hervorgeht. Als Schutzgas dient in erster Linie Argon. Nur geringe Anteile an CO₂ werden heute für die Anwendung des MAG-Verfahrens empfohlen. Die Verwendung höherer CO₂-Gehalte erscheint auch unter dem Aspekt seiner Oxidationswirkung auf Magnesium und einer hieraus resultierenden möglichen Graphitentartung problematisch.

Aus energetischen Überlegungen ist noch das Elektronenstrahlschweißen [94] zu nennen. Es weist theoretisch ein sehr günstiges Wärmeeinbringen auf. Schweißungen ohne Zusatzmaterial führten zu

unbefriedigenden Ergebnissen. Durch eine Nickeleinlage konnten die Aufhärzonen im Bereich des Grundwerkstoffes auf ein Minimum beschränkt werden. Wegen des verfahrenstechnischen Aufwandes bleibt dieses Verfahren aber auch in der Zukunft mit großer Wahrscheinlichkeit speziellen Anwendungen vorbehalten.

Die **Bilder 101** und **102** enthalten Werte für die Biegegewichselfestigkeit von Schweißverbindungen aus ferritischem und perlitischem Gusseisen mit Kugelgraphit. Diese stimmen recht gut mit den bei den „normalen“ Tempergussorten (nicht GJMW) vergleichbarer Festigkeitsklasse ermittelten Ergebnissen überein [95,96].

Tabelle 7: Festigkeitseigenschaften quer zur Naht von stumpfgeschweißten 25 mm dicken Platten aus Gusseisen mit Kugelgraphit, geschweißt nach dem Kurzlichtbogenverfahren unter Argon; Probestücke mit Dmr. 14,3 mm auf 80 mm Länge [89]

Grundwerkstoff	Zusatzwerkstoff	Zugfestigkeit R_m [N/mm ²]	0,2-%-Dehngrenze $R_{p0,2}$ [N/mm ²]	Bruchdehnung über die Schweißnaht		Bruchlage
				($l_0 = 2''$) [%]	($l_0 = 1/2''$) [%]	
perlitisch, Gusszustand	ungeschweißt	630 - 790	390 - 470	1,3		-
	S-NiTi4	532 589	365 365	3,0 4,0	12,0	Schmelzlinie und wärmebeeinflusste Übergangszone
	S-NiCu32Ti	509 501	353	3,0 2,0		Schmelzlinie Schmelzlinie und wärmebeeinflusste Übergangszone
ferritisch geglüht	ungeschweißt	390 - 550	240 - 320	15 - 25		-
	S-NiTi4	435	309	11,5		Grundwerkstoff Grundwerkstoff
		425	312	11,5		
	S-NiCu32Ti	425	309	12,5		Grundwerkstoff Grundwerkstoff Schmelzlinie und Schweißgut Schmelzlinie und Schweißgut Schmelzlinie und Schweißgut
		425	302	14,0	6,0	
409 425 354		307 312 315	7,5 6,0 3,5	4,0 2,0		

Tabelle 8: Festigkeitseigenschaften¹ quer zur Stumpfnah zwischen 13 mm dicken Platten aus niedrig gekohltem Baustahl und perlitischem Gusseisen mit Kugelgraphit, nach dem Kurzlichtbogenverfahren unter Argon geschweißt² [91]

Zusatzwerkstoff	Zugfestigkeit R_m [N/mm ²]	0,2-%-Dehngrenze $R_{p0,2}$ [N/mm ²]	Dehnung über die Schweißnaht		Bruchlage
			($l_0 = 2''$) [%]	($l_0 = 1/2''$) [%]	
S-NiTi 4	500	302	15,5	4,0	außerhalb der Schweißzone im Baustahl
	500	321	13,0	4,0	
	510	311	12,0	4,0	

¹ Probestücke mit 6,4 mm Dmr. auf 60 mm Länge

² Schweißbedingungen: V-Naht, 80° Öffnungswinkel: Wurzelsteg und -spalt; je 1,6 mm; Zwangskräfte: fest an 50 mm dicke Platte geklemmt; Stromstärke: 150 A; Lichtbogenleistung: 22 V Gleichspannung, Elektrode am Pluspol; Drahtvorschub: 8,8 m/min; Argonverbrauch: 12,5 l/min.; Vorwärmung: keine; Werkstücktemperatur: 20 °C

6.4.4 Schweißen ohne Zusatzwerkstoff

Als besonders geeignet für Schweißverbindungen aus Gusseisen mit Kugelgraphit oder Stahl haben sich die Pressschweißverfahren herauskristallisiert. Zu ihnen gehören das **Abbreinstumpfschweißen**, das Schweißen mit magnetisch bewegtem Lichtbogen (**Magnet-Arc-Schweißen**) und das **Reibschweißen**. Alle drei Verfahren weisen folgende gemeinsame charakteristische Merkmale auf:

- Sie benötigen keinen Zusatzwerkstoff. Die Schweißverbindung entsteht durch Zusammenpressen der Fügeflächen am Ende des Schweißprozesses aus dem Werkstoff der Verbindungspartner und bildet somit ein artgleiches oder artähnliches Schweißgut.
- Durch den Pressvorgang wird der beim Schweißen gebildete unerwünschte Ledeburit aus der Fügefläche in den Wulst gepresst, wo er den Kraftverlauf nicht mehr beeinträchtigen kann. Es besteht zusätzlich die Möglichkeit, den Wulst und damit Ledeburit vor der Weiterverarbeitung der Schweißkonstruktion durch Abdrehen zu entfernen.
- Alle drei Verfahren sind automatisierbar. Ihre Schweißparameter sind prozesssicher reproduzierbar und dokumentierbar. Im Einsatz in Transferstraßen sind somit alle Voraussetzungen für eine reibungslos funktionierende Großserienfertigung auch von hochbeanspruchten Sicherheitsteilen, zum Beispiel des Automobilbaus, erfüllt.

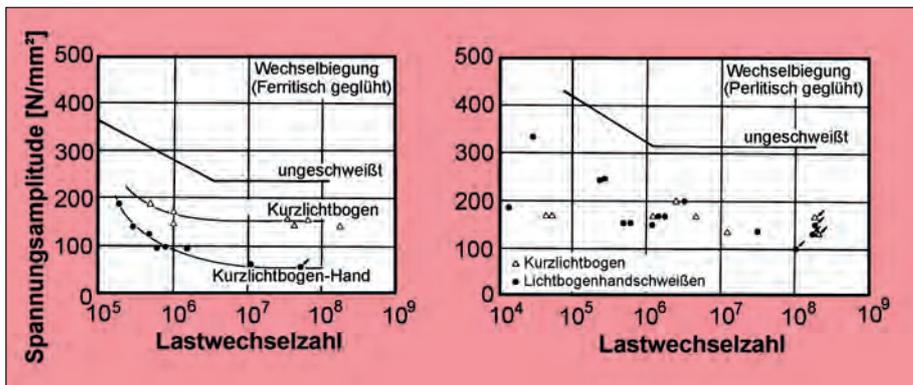


Bild 101: Biegewechselfestigkeit von ungeschweißtem und geschweißtem Gusseisen mit Kugelgraphit für ferritisches GJS (links)

Bild 102: Biegewechselfestigkeit von ungeschweißtem und geschweißtem Gusseisen mit Kugelgraphit für perlitisches GJS (rechts)

Diese Verfahren eignen sich besonders für das Schweißen von Gusseisen mit Kugelgraphit in der Großserie, wie es vor allem in der Automobilindustrie genutzt wird. Dabei konnte nachgewiesen werden, dass zum Beispiel Gusseisen mit Kugelgraphit für hoch beanspruchbare Verbindungsschweißungen (früher: Konstruktionsschweißungen) in Sicherheitskonstruktionen wirtschaftlich einsetzbar ist.

6.4.4.1. Abbrenn-Stumpfschweißen

Das Abbrenn-Stumpfschweißen ist ein Widerstandspress-Schweißverfahren bei dem die Schweißwärme mittels Widerstandserwärmung unmittelbar in der Schweißmaschine durch den Sekundärstrom erzeugt wird. Die unter Spannung stehenden Fügeile werden hierbei mit definierter Kontaktkraft gegeneinander gefahren und nach vorgegebener Zeit wieder auseinanderggezogen (Reversiervorgang). Durch dieses Ein- und Ausschalten des Stromes mit Steuerung von zum Beispiel Schweißspannung, Kontaktkraft, Kontakt- und Pausenzeit werden die Kontaktstellen erwärmt. Diese Vorwärm-schritte werden solange wiederholt, bis die Energie an den Stoßenden ausreicht, um den anschließenden Abbrennprozess aufrecht zu erhalten.

In der Abbrennphase entstehen an den zu verbindenden unter Strom stehenden Werkstücken im Bereich erster Berührungsstellen „Schmorkontakte“. Die enorme Stromdichte in den Stromübergangsstellen führt zu einem schnellen Erwärmen und Schmelzen des Metalls. Der hohe Widerstand als Folge ungenügenden Zusammendrückens der Kontaktflächen vergrößert die Abschmelzgeschwindigkeit an der Schweißstelle. Durch die teilweise eintretende Verdampfung entsteht in der Schweißfuge ein Metallampfdruck. Dieser schleudert

schmelzflüssige Phase aus dem Schweißspalt und schafft dabei gleichzeitig eine „Schutzgasatmosphäre“, die den Luftsauerstoff von der Schweißstelle fernhält. Der Abbrennvorgang wird bis zum Erreichen der geeigneten Schweißtemperatur für beide Werkstückenden fortgesetzt. Erst dann leitet die Maschinensteuerung den Stauchvorgang und kurze Zeit später auch das Abschalten des elektrischen Stromes ein.

Große, dickwandige Gussstücke werden üblicherweise mit Vorwärmung geschweißt. Beim Schweißen von Bauteilen mit geringer Wanddicke kann auf das Reversieren verzichtet werden. Man spricht dann vom Abbrenn-Stumpfschweißen ohne Vorwärmung oder vom Abbrennen aus dem Kalten (**Bild 103**).

Bei modernen Maschinen kann die Schweißstelle noch in der Maschine, das heißt ohne Zwischenabkühlung mit ihrer potenten Gefahr für die Bildung rissträchtiger Härtegefüge, einer (Widerstands-)Wärmenachbehandlung mit einem Abkühlungsverlauf entsprechend dem ZTU-Diagramm im **Bild 104** unterzogen werden.

6.4.4.2 Schweißen mit magnetisch bewegtem Lichtbogen

Das Schweißen mit magnetisch bewegtem Lichtbogen, auch Magnetarc-Schweißen genannt, gehört zu den Lichtbogen-Pressschweißverfahren. Dabei macht man sich zu Nutze, dass der Lichtbogen durch ein definiert gesteuertes Magnetfeld in verschiedene Richtungen abgelenkt werden kann. Je nach Feldrichtung und -intensität kann der Lichtbogen ebenso um seine Achse rotieren oder in eine elliptische Form unterschiedlicher Stromdichte gezwungen werden. Bei den meisten bekannten und bewährten technischen Anwendungen wird der Lichtbogen zwischen zwei Rohren bewegt.

Das Schweißen erfolgt in voll mechanisierten oder automatisierten Anlagen. Die Teile werden in der Maschine zentriert eingespannt. Der Lichtbogen wird durch Berührung der zu verschweißenden Flächen gezündet, läuft mit zunehmender Geschwindigkeit an den Stoßflächen um und schmilzt sie an. Nach festgelegter Zeit werden die beiden Teile unter Druck zusammengepresst und der Strom dann abgeschaltet. Geschweißt wird mit Gleichstrom. Die Lichtbogenumlaufgeschwindigkeit beträgt je nach Stromstärke, Magnetfeld und Schutzgas zwischen 30 und 150 m/s, was einer Umlauffrequenz zwischen 200 und 2000 Hz entspricht.

Im Prozessablauf können die im **Bild 105** gezeigten vier Verfahrensschritte unterschieden werden. Im Gegensatz zum Abbrennstumpfschweißen erfordert das Magnetarc-Schweißen geschlossene Profile und vorzugsweise Rotationssymmetrie. Abweichungen hiervon zum Beispiel in Richtung Ovalität sind möglich.

Folgende Vorteile sind für das Magnet-schweißen zu nennen:

- wirtschaftliches Schweißverfahren mit Schweißzeiten um 10 Sekunden,
- kein Zusatzwerkstoff erforderlich,
- bewährtes Schweißverfahren, dessen Prozesssicherheit in der Praxis vielfach nachgewiesen wurde (bisher über 4 Mio. Verbundlenker-Hinterachsen frontgetriebener PKW der Astra-Klasse sowie des Kompakt-Van Zafira (**Bild 106**)).

Von Nachteil ist, dass Wanddicken auf maximal 6 mm begrenzt sind. Zur Zeit laufen Entwicklungen zur Ausweitung der Wanddickenbegrenzung auf 8 bis 10 mm durch Vorwärmen der Schweißstelle.



Bild 103: Abbrennstumpfgeschweißte Buchsachsenteile aus EN-GJS-600-3 (Bild: Georg Fischer Automotive, Schaffhausen)

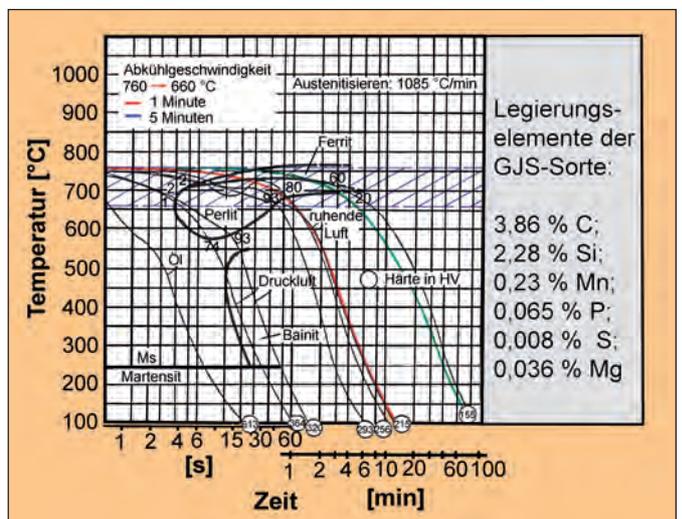


Bild 104: ZTU-Schaubild auf 750 °C nomiert für die kontinuierliche Abkühlung einer GJS-Legierung mit Kurvenverläufen für das Nachwärmen in der Schweißmaschine beim Abbrennstumpfschweißen

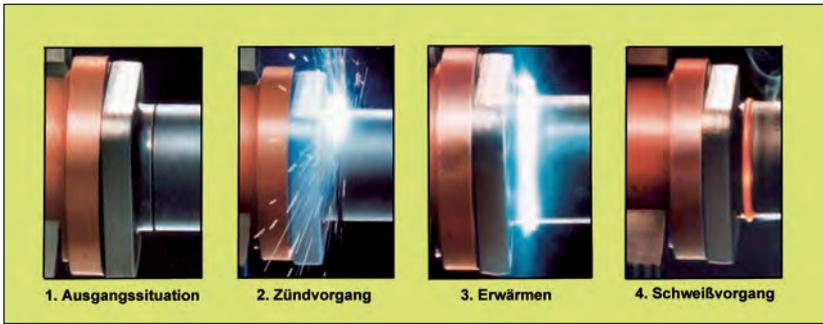


Bild 105: Verfahrensablauf beim Magnetarc-Schweißen von Gusseisenteilen
 Phase 1: Spannen und Aneinanderfahren der beiden Werkstücke
 Phase 2: Einschalten von Schutzgas und Schweißstrom
 Phase 3: Erwärmen der Stoßflächen durch Rotation des Lichtbogens
 Phase 4 Schweißvorgang

Die zeitlichen Verläufe von Weg, Druck, Schweißstrom und Spulenstrom werden gemeinsam mit weiteren Parametern vor-eingestellt sowie während des Schweißprozesses überwacht und dokumentiert. So ist jegliche Abweichung von den Sollwerten identifizierbar. Fehlerhafte Schweißungen können unmittelbar am Ende des Schweißprozesses schon vor einer eventuell erforderlichen thermischen Nachbehandlung aussortiert werden.

Magnetarc geschweißte Achsen, Ventilgehäuse, Achslenker usw. stellen bewährte Beispiele dar. Bei dem Anwendungsfall Längslenker aus EN-GJS-400-15 wurden seitens der Automobilindustrie zusätzliche Forderungen hinsichtlich des maximalen Perlitgehalts der zu verschweißenden Längslenker an die Gießerei gestellt. Diese konnten nur durch eine Anhebung des Siliciumgehaltes gegenüber der normalen Fertigung von ferritischem Gusseisen mit Kugelgraphit der Sorte EN-GJS-400-15 erfüllt werden (**Bild 106**). Außerdem ist bei diesem Gussteil ein Anlassen erforderlich.

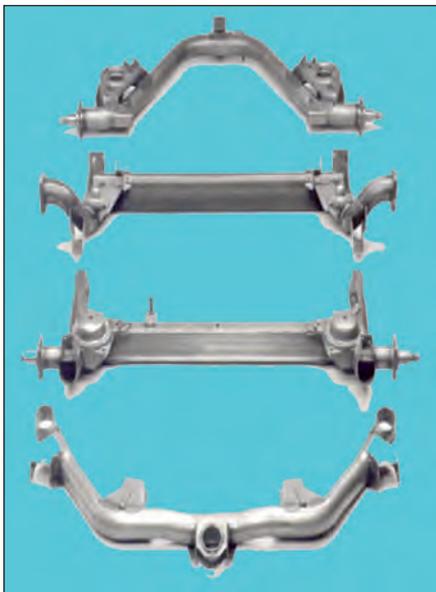


Bild 107: Diverse Magnetarc geschweißte Hinterachsen (Bild: KUKA)

6.4.4.3 Reibschweißen

Dieses Schweißverfahren gehört in die Gruppe der Warmpress-Schweißverfahren. Die Wärme wird durch Reibung, das heißt durch Relativbewegung unter Druck auf die Berührungsoberflächen der zu verbindenden Schweißteile erzeugt. Verfahrenseitig kann beim Reibschweißen zwischen konventionellem und Schwungrad-Reibschweißen unterschieden werden. Beim konventionellen Reibschweißen erfolgen der Antrieb und das Abbremsen des zu verschweißenden rotierenden Füge-teils durch starke Elektromotoren. Beim Schwungrad-Reibschweißen wird die einzubringende Wärmeenergie durch die Masse und die Drehzahl des Schwungrades festgelegt.

Das Know-how des Reibschweißens liegt in der richtigen Kombination, Modifikation und Verlauf von Anpressdruck und/oder Drehzahl zu jeder Zeit des Schweißvorganges, wobei die modernen Steuerungen praktisch keine Grenzen hinsichtlich des Verlaufs der Druck-/Drehzahlkurven setzen. Druck- und Drehzahländerungen können kontinuierlich und auch stufenartig geplant werden. Die dabei verwendeten Drehzahlen liegen zwischen 500 und 3 000 U/min, die Drücke zwischen 20 und 100 N/mm².

Nach einer ausreichenden Erwärmung der Fügefläche wird die Rotation der Reibspindel zur Vorbereitung der sogenannten Stauchphase abrupt abgebremst und die beiden Füge-teile dann schlagartig zusammengepresst. Dabei kann das Stauchen sowohl in die noch definiert drehende als auch in die stehende Spindel erfolgen. Die dabei verwendeten Stauchdrücke liegen in der Regel oberhalb der für das Reiben verwendeten Reibdrücke. Die nacheinander ablaufenden Verfahrensschritte beim Reibschweißen sind im **Bild 108** dargestellt.

Bei der Planung von reibgeschweißten Konstruktionen muss die Rotations-symmetrie der Teile berücksichtigt werden. Nicht rotationssymmetrische Teile

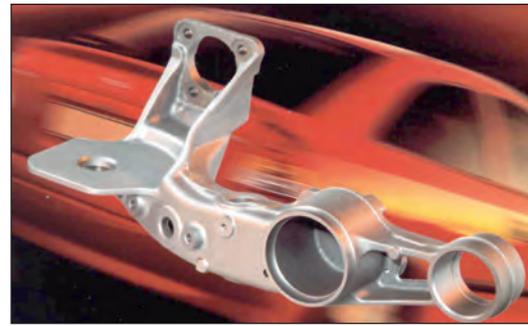


Bild 106: Längslenker für die Hinterachse des Opel Astra und Zafira aus EN-GJS-400-15 (Bild: Georg Fischer Automotive, Schaffhausen)

können zwar mit minimaler Winkelabweichung verschweißt werden. Das Verfahren wird aber wegen möglicher Oxideinschlüsse dann nicht empfohlen.

Mit dem Reibschweißen können die meisten unterschiedlichsten Werkstoffpaarungen erfolgreich verbunden werden. Verbindungen gleicher Werkstoffe sind in der Regel ohne Wanddickeneinschränkung, das heißt bis zum Vollquerschnitt möglich. Bei Gusseisenwerkstoffen werden die Wanddicken durch die Notwendigkeit des Herauspressens des sich bildenden Ledeburits begrenzt (siehe Vorteile des Abbrunnstumpfschweißens in Abschnitt 6.4.4.1). Die Schweißzeiten sind kurz und liegen im Bereich von 10 bis 30 s. Für die Schweißungen ist kein Zusatzwerkstoff notwendig. Nachteilig ist, dass Reibschweißungen zwischen unterschiedlichen Werkstoffen oft aus physikalischen Gründen auf Hohlprofile eingeschränkt werden müssen (**Bild 109**)

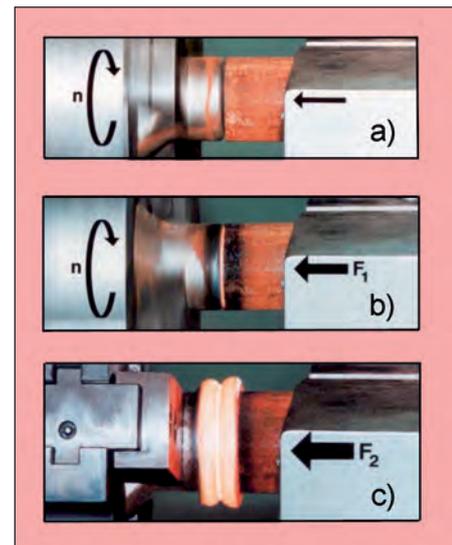


Bild 108: Verfahrensablauf beim Reibschweißen
 a) Spannen der zu verbindenden Bauteile und Rotation eines Teils
 b) Aneinanderdrücken beider Bauteile mit Reibkraft F_1 , Reiberwärmen der Schweißflächen durch Rotation n und Reibkraft F_1
 c) Abbremsen des drehenden Bauteils und Verschweißen durch Stauchkraft F_2

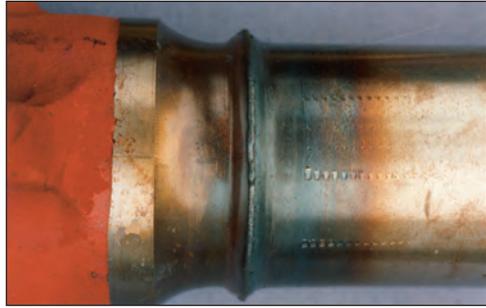


Bild 109: Reibschweißverbindung zwischen einem Hinterachsgehäuse aus EN-GJS-400-18 und Tragrohren aus E295 (Bild: W. Hundhausen, Schwerte)

Von einer Gießerei wurde die Verbundkonstruktion zwischen einem Vorderachsgehäuse aus EN-GJS-400-18 und Tragrohren aus Stahl E295, die an das Gehäuse mittels Reibschweißens verbunden wurden, bis zur Serienreife entwickelt. Im **Bild 110** wird eine Verbindung mit Gelenkwellen aus E295 gezeigt. Interessant bei dieser Verbindung ist die Positioniergenauigkeit der Gelenkwellen, die bei derartigen großen Teilen kleiner $\pm 1,5^\circ$ beträgt. Für Kleinteile wird die Positioniergenauigkeit im Bereich von ± 30 Minuten angegeben.

Detaillierte Informationen zu den zusätzlichen Schweißverfahren sind in [85] enthalten.

6.4.5 Fertigungsschweißen

Im Gegensatz zum Verbindungsschweißen zu konstruktiven Zwecken handelt es sich beim Fertigungsschweißen um ungeplante Schweißungen an Gussteilen während der Fertigung in der herstellenden Gießerei. Häufig geht es darum, nach dem Ausschleifen von Sand- oder Schlackeeinschlüssen die Gebrauchsfähigkeit sicherzustellen. Selbstverständlich muss auch hierbei der angewendete Schweißprozess den Anforderungen an später zu erwartende statische oder dynamische Lastfälle des Bauteiles gerecht werden [93] (**Bilder 111** und **112**).

Die Vorgehensweise im Fall einer erforderlichen Fertigungsschweißung muss vor Annahme der Bestellung vereinbart werden. Schließt die Bestellspezifikation eine Fertigungsschweißung von vorneherein aus, kann im Bedarfsfall die Sicherstellung der Gebrauchsfähigkeit unter Umständen nicht mehr gewährleistet werden. Gerade im Bereich Einzel- und Wiederholteilerfertigung und insbesondere bei größeren Komponenten kann diese Klausel zu wirtschaftlichen Verlusten und Lieferverzögerungen führen, wobei Nachteile für beide Vertragspartner entstehen.

Die Anwendung des Fertigungsschweißens bedarf gemäß **DIN EN 1559-3** (Technische Lieferbedingungen; Eisenguss-



Bild 110: Vorderachskörper aus EN-GJS 400 -18 mit angeschweißten Gelenkstücken aus E295, Positioniergenauigkeit der Gelenkstücke kleiner ± 1 Grad (Bild: W. Hundhausen, Schwerte)

stücke) einer schriftlichen Vereinbarung zwischen Hersteller (Gießerei) und Käufer. Darin kann geregelt sein, wie Schweißungen ausgeführt werden dürfen:

- allgemein ohne Rückfrage an den Käufer;
- bis zu einem bestimmten Ausmaß ohne Rückfrage an den Käufer;
- nach Erlaubnis des Käufers für spezielle Fälle.

Die Dokumentation von Fertigungsschweißungen soll in geeigneter Form durchgeführt und auf Wunsch des Kunden beigelegt werden.

Die Anforderungen an die Ausführungsqualität beziehungsweise die Prüfkriterien erfolgt auf Grundlage der **DIN EN 1011-8** (Empfehlungen zum Schweißen metallischer Werkstoffe; Schweißen von Gusseisen). Hier werden

- zum einen die Merkmale einer Anforderungsklasse,
- und zum anderen Grenzwerte für Unregelmäßigkeiten,

so gewählt, dass das Gussteil den Anforderungen an die zu erwartende Betriebsbelastung ausreichend gerecht wird.

Die Eignung des Schweißbetriebes kann durch verschiedene oder kombinierte Methoden nachgewiesen werden:



Bild 111: Detailansicht des präparierten Schweißbereiches für das Metalllichtbogenschweißen mit Fülldrahtelektrode von großen Gusseisenteilen (Bild: Siempelkamp, Krefeld)

- Zertifizierung gemäß **DIN EN ISO 3834** (Ersatz für DIN EN 729) als Schweißbetrieb mit wählbarer, eingestufte Qualitätsanforderung.
- Qualifizierung eines Schweißverfahrens mittels Durchführung einer Schweißverfahrensprüfung (zum Beispiel gemeinsam mit dem Kunden oder einer Klassifikationsgesellschaft) und Festlegung einer entsprechenden Schweißanweisung (zum Beispiel **DIN EN ISO 15609-1** Anforderung und Qualifizierung von Schweißverfahren für metallische Werkstoffe – Schweißanweisung – Lichtbogenschweißen).

Zum Zeitpunkt dieser Veröffentlichung sind zwei gusseisenspezifische Normen in Vorbereitung, welche nach Erscheinen weitere Hersteller-Qualifizierungen auf normativer Basis zulassen:

- **prEN ISO 15614-3** Anforderung und Anerkennung von Schweißverfahren für metallische Werkstoffe – Schweißverfahrensprüfung – Schmelzschweißen von unlegierten und niedrig legierten Gusseisen,
- **ISO 9606** Schweißerprüfungen – Schmelzschweißen – Gusseisen

Weiterführende Informationen zum Schweißen von Gusseisen sind in [85, 91, 98 - 100] enthalten.



Bild 112: Artfremde Schweißung an einem 23 t schweren Motorblock aus EN-GJS-400-18U (Bild: Siempelkamp, Krefeld)

6.4.6 Reparaturschweißen

Unerwartete Bauteilausfälle als Folge von Brüchen an zum Beispiel Motorenblöcken, Zylindergehäusen, Maschinen- oder Presseständen können in der laufenden Fertigung erhebliche Produktions- und Einnahmeausfälle, Vertragsverletzungen durch Nichteinhaltung von Lieferverpflichtungen verursachen oder sogar zu Auftragsverlusten führen. Da derartige große Bauteile in der Regel nicht von heute auf morgen wiederbeschafft werden können, ist Reparaturschweißen der gebrochenen Gussteilhälften, der abgebrochenen Bauteilsegmente oder das Beiseitigen unzulässigen Verschleißes oder inakzeptabler Fehlstellen am Gussteil häufig die einzige terminlich vertretbare und/oder wirtschaftliche Lösung dieser Problematik.

Selbstverständlich wird bei einer derartigen Reparatur vom Auftraggeber vorausgesetzt, dass die Gusskonstruktion nach der Schweißung wieder die gleichen Eigenschaften aufweist wie vor der Schweißung. Das bedingt eine Spezialisierung der ausführenden Firmen hinsichtlich der maschinellen, wärme- und schweißtechnischen Einrichtungen, der Ausbildung und Überwachung des Personals und nicht zuletzt des Qualitätsmanagementsystems. Reparaturschweißungen werden an allen unlegierten und legierten Sorten der Gusseisenpalette mit Lamellen-, Vermicular- und Kugelgraphit durchgeführt.

Folgende Voraussetzungen sind für das Reparaturschweißen erforderlich:

- Für die Planung und Durchführung der Schweißung(en) sowie für die Auswahl des geeigneten Schweißzusatzwerkstoffes für den jeweiligen Anwendungsfall ist ein großes Erfahrungspotential erforderlich. Dabei muss bei Bedarf der Schweißzusatzwerkstoff aus den Normzusatzwerkstoffen ausgewählt oder in Eigenregie hergestellt und/oder durch Zulegieren von Begleit- und/oder Legierungselementen auf die Zusammensetzung des Grundwerkstoffes angepasst werden. Für die Schweißung muss ausreichendes Personal- und Ersatzpersonal mit entsprechender Qualifikation bereitgestellt werden.
- Die Bauteile müssen vor der Schweißung vollständig demontiert werden.
- Die Bauteile müssen als Einheit in dem zur Verfügung stehenden Glühofen positioniert werden können.
- Die zu verschweißende Stelle muss für das Schweißen in Wannennlage gebracht werden. Senkrechtes und



Bild 113: Maschinenbett aus EN-GJS-400-15, Gewicht 4 t (Bild: C. Hahn, Remscheid)
links: In zwei Hälften zerbrochenes Teil
rechts: mit arteigenem Schweißgut wieder instandgesetztes Teil

Überkopfschweißen ist bei artgleichem Schweißen von Gusseisenwerkstoffen nicht möglich.

Das nachfolgende Beispiel stellt hieraus nur ein, wenn auch anschauliches Beispiel dar, an dem gezeigt werden soll, wie das Reparaturschweißen heute von darauf spezialisierten Firmen mit entsprechender Erfahrung bewältigt wird.

Im **Bild 113** ist ein erfolgreich wieder instandgesetzter Tisch für eine Vier-Säulen-Pressen aus EN-GJS-400-15 zu sehen. Das 5 m lange und 1,80 m breite

Gussteil war in der Mitte durchgebrochen. Im rechten Bildteil ist das geschweißte und bearbeitete Bauteil unmittelbar vor dem Wiedereinbau in die Maschine zu sehen. Das Schweißen erfolgte mit arteigenem Zusatzwerkstoff, von dem 320 kg für diese Schweißung benötigt wurden.

In [85] wird ausführlich der Ablauf einer Reparaturschweißung gezeigt.

In **Bild 114** sind exemplarisch weitere Beispiele für erfolgreiche Schweißanwendungen an Gussteilen aus GJS dargestellt.

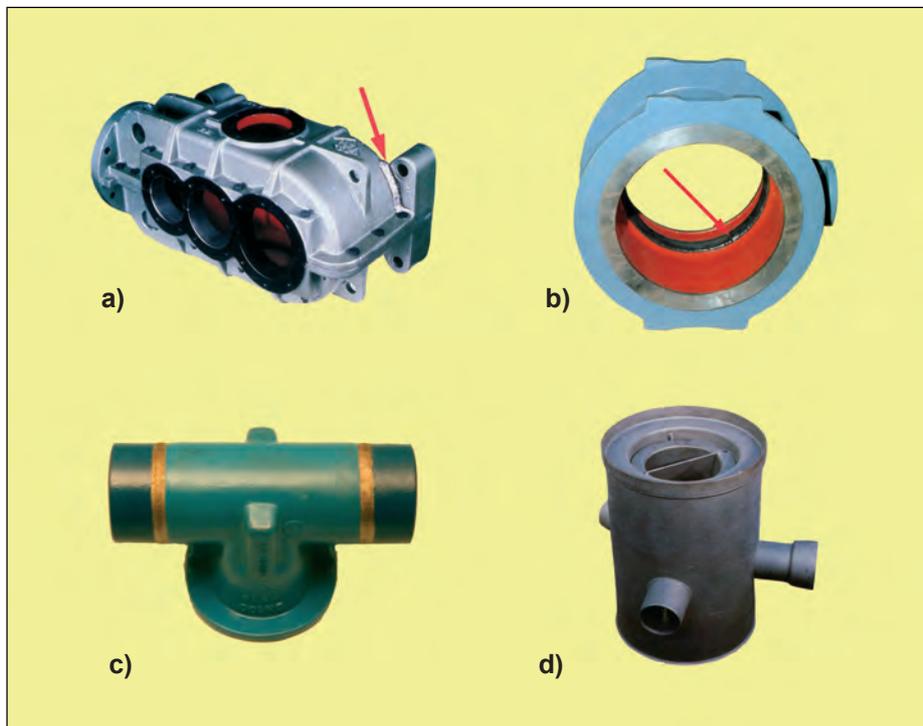


Bild 114: Beispiele für Schweißungen an Gussteilen aus GJS

- a) Getriebegehäuse für Abraumförderergerät aus EN-GJS-400-15 mit artfremd wieder angeschweißtem abgebrochenen Flansch
- b) Absperrschiebergehäuse aus EN-GJS-500-7, bei dem mit einer NiCu-Elektrode die Dichtfläche aufgeschweißt wurde
- c) Druckdichte Gussarmatur mit vorgeschuhten Stahlrohren, verschweißt für den Einsatz bei Tieftemperaturen
- d) Einlaufschacht für Abwässer mit drei Anschlüssen aus GJS, verschweißt mit Rahmen- und Bodenplatte aus Stahlblech

7 Qualitätsmanagement, Qualitätssicherung und Qualität

Die Begriffe Qualitätsmanagement, Qualitätssicherung und Qualität sind in der **DIN 55 350** eindeutig definiert:

- Qualitätsmanagement ist die gezielte und systematische Mitarbeit aller Beteiligten im Unternehmen, die Anforderungen des Kunden in das Produkt zur Zufriedenheit des Kunden umzusetzen;
- Qualitätssicherung beinhaltet alle Maßnahmen, die von allen an der Fertigung Beteiligten zur Erzielung der geforderten Qualität durchzuführen sind,
- Qualität ist der Begriff für die Gesamtheit aller Eigenschaften und Merkmale eines Produktes, die sich auf dessen Eignung im Hinblick auf die vorgegebenen Erfordernisse beziehen (Anforderungen des Kunden an das Gussteil).

Mit diesen Begriffen sind die Anforderungen an die Unternehmensstrukturen, Mitarbeiter und das Produkt „Gussteil“ beschrieben.

7.1 Qualitätsmanagement

Seit der Einführung des Regelwerkes **DIN EN ISO 9000 ff** im Jahre 1994 ist es zum Standard geworden, dass in der Gießerei Qualitätsmanagementsysteme aufgebaut, beschrieben und implementiert wurden. Nach anfänglich zögerlichem Verhalten bezüglich der Zertifizierung dieser Systeme vor allem aus Kostengründen mussten die Unternehmen erkennen, dass eine Zertifizierung durch eine akkreditierte Organisation zwingend erforderlich ist. Zum Teil kamen die Forderungen dafür allerdings auch aus der Kundschaft. Andererseits wurde erkannt, welches Verbesserungspotential und mögliche Kostenreduzierungen durch ein

Festschreiben der Prozesse und Tätigkeiten in einem Qualitätsmanagement-Handbuch vorhanden waren.

Es stellte sich nach der Einführung dieser Normen sehr schnell heraus, dass es mehr Sinn macht, die im Unternehmen ablaufenden Prozesse, anstatt einzelne Elemente in der Fertigung zu beschreiben. Auf der Grundlage dieser Erkenntnisse und Erfahrungen entstand die Neufassung der **DIN EN ISO 9001**, Ausgabe 2000, die Prozess orientiert gegliedert ist. Als wichtigste Neuerungen in der DIN EN ISO 9001:2000, die auch für die Gießereien verbindlich ist und in deren Qualitätssystem Berücksichtigung finden, sind:

- Kundenorientierung und -zufriedenheit (Bewusstsein für die Kundenanforderungen bei Mitarbeitern fördern und Analyse der Kundenanforderungen),
- Prozessorientierung (Tätigkeiten nicht Elemente, sondern Ablauf bezogen darstellen),
- Mitarbeiterorientierung (Mitarbeiterfähigkeiten fördern und ausnutzen),
- Messbarkeit der Ziele (Wirksame Entscheidungen beruhen auf Analysen von Daten),
- Betrachtung der Abläufe im Qualitätsmanagement-System als Prozess,

wobei ein Prozess nach **DIN EN ISO 9000** wie folgt definiert ist: „...Satz von in Wechselbeziehung oder Wechselwirkung stehenden Tätigkeiten, der Eingaben in Ergebnisse umwandelt“.

Das Managementsystem muss die Prozesse erkennen und definieren, die dann Eingang in die Qualitätsmanagement-Dokumentation der Gießerei finden. Damit ist das Qualitätssicherungs-Handbuch der Gießerei das aussagefähige Dokument für die organisatorischen Aspekte der Produktionsabwicklung von der Planung

und Entwicklung von Gussteilen bis hin zu dem Umgang mit Kundenbeziehungen.

Im **Bild 115** ist der Prozessregelkreis, so wie die Norm ihn definiert, beispielhaft aufgezeigt. Die in der alten Norm von 1994 angewendete Gliederung der Qualitätsmanagement-Dokumentation in Arbeits- und Betriebsanweisungen, Verfahrensanweisungen und das Qualitätssicherungs-Handbuch ist trotz der Neuerungen geblieben.

Inzwischen hat die Computertechnik Einzug in alle Unternehmen gehalten, so dass es sinnvoll ist, die Qualitätsmanagementsystem-Dokumentation auch per EDV anzubieten. Ausgenommen hiervon können Arbeits- und Betriebsanweisungen sein, die der Mitarbeiter direkt an seinem Arbeitsplatz in der Produktion benötigt. Wurde die papierlose Variante gewählt, so ist es von großer Bedeutung, eine anwenderfreundliche und für den Mitarbeiter gut handhabbare Software und Darstellungsform zu benutzen. Beispielhaft wird dies im **Bild 117** dargestellt. Neben den auf dem Softwaremarkt zu beziehenden Programmpaketen sind auch einfache Inhouse-Lösungen denkbar.

Immer häufiger wird neben einem installierten Qualitätsmanagement-System auch die Frage nach einem Umweltmanagement-System gestellt. Nicht zuletzt aus Standortgründen, beispielsweise wenn ein Unternehmen in einem Wohnmischgebiet liegt, wird zusätzlich ein Umweltmanagement-System nach **DIN EN ISO 14001** oder vergleichbaren Regelwerken eingeführt. Da sich in beiden Dokumentationen viele Dinge gleichen und auch Schwerpunkte auf die Prozessbeschreibung gelegt werden, wird verstärkt dazu übergegangen, diese Systeme zu einem integrierten Managementsystem zusammenzufassen. In der Zukunft wird zu den beiden Systemen noch das Arbeitsschutz-Management-System nach **OHSAS 18001** hinzugefügt werden.

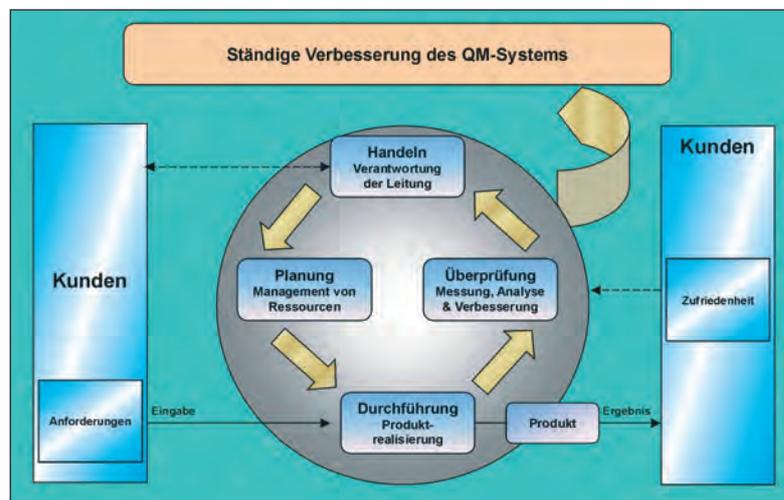


Bild 115: Qualitätsregelkreis eines Qualitätsmanagementsystems



Bild 116: Automatisches Vermessen eines bearbeiteten Ständergussteils (Bild: Meuselwitzguss)

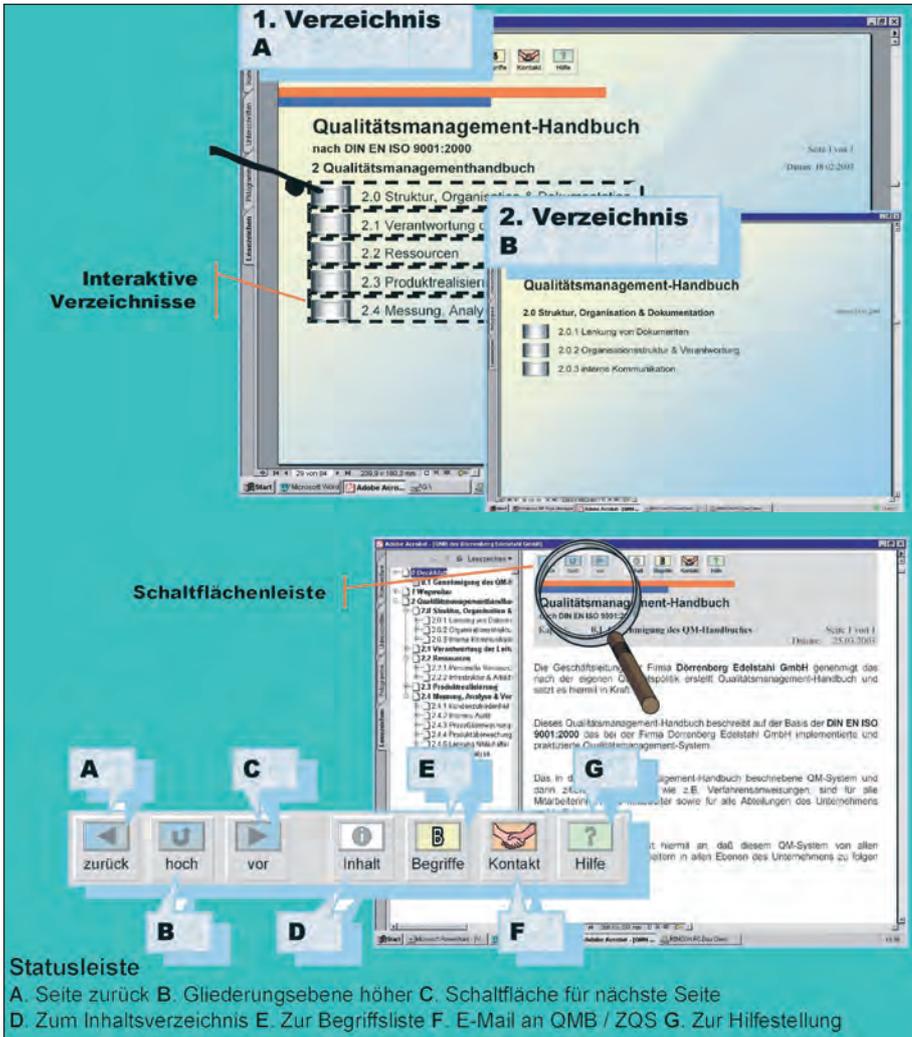


Bild 117: Beispiel einer rechnergestützten Qualitätsmanagement-Dokumentation

7.2 Qualitätssicherung, Prüfen und Überwachen der Gussteilherstellung

Heute ist Qualitätssicherung (QS) ein Produkt aus Kundenforderung, Qualitätsplanung und Fertigung. Zum Festlegen der allgemeinen technischen Lieferbedingungen für Gussteile aus Gusseisen mit Ku-

gelgraphit stehen die folgenden Normen und Richtlinien zur Verfügung:

- **DIN ISO 8062** „Gussstücke - System für Maßtoleranzen und Bearbeitungszugaben“,
- **DIN 1685-1** „Gussroherteile aus Gusseisen mit Kugelgraphit - Allgmeintoleranzen, Bearbeitungszugaben“ (gilt nicht für Neukonstruktionen!),

- **DIN EN 1559-1** „Gießereiwesen-Technische Lieferbedingungen-Teil 1: Allgemeines“,
- **DIN EN 1559-3** „Gießereiwesen-Technische Lieferbedingungen-Teil 3: Zusätzliche Anforderungen an Eisen-gussstücke“.

DIN 1685-1 basiert auf der für alle Rohgussteile gültigen Norm **DIN 1680** und beschreibt im Wesentlichen den Genauigkeitsgrad und die Bearbeitungszugaben von Gussstücken aus Gusseisen mit Kugelgraphit. Die Bezeichnung „Allgemeintoleranz“ ersetzt den früher üblichen Begriff „Freimaßtoleranz“. Für Eisenguss gilt die Gruppe B der Gussallgemeintoleranz, die empirisch ermittelt, auf der Basis des Trendverlaufes von Messungen beruht. Der Genauigkeitsgrad von Längenmaßen ist kleiner, sie sind also enger toleriert als Dickenmaße, wie beispielsweise für eine Wand, einen Steg oder eine Rippe. Das Toleranzfeld für Außen- und Innenrundungen ist so aufgeteilt, dass das untere Abmaß stets Null wird. Seit dem Erscheinen der **DIN ISO 8062** gilt die **DIN 1685-1** nur noch für bestehende Konstruktionen. Für Neukonstruktionen sind die Anforderungen der **DIN ISO 8062** einzuhalten. Dies bedeutet im Einzelnen Änderung der Toleranzbezeichnung von GTB in CT.

Die **DIN EN 1559** ist die Basisnorm für die Lieferbedingungen aller metallischen Gussteile einschließlich der Definition der abzuliefernden Qualität. Die Werkstoffbezogenen Anforderungen werden in speziellen Werkstoffnormen geregelt. Die **DIN EN 1559 Teil 1** regelt die erforderlichen Bestellangaben und zu definierende Angaben bezüglich der:

- Herstellung,
- chemischen Zusammensetzung,
- Werkstoffeigenschaften sowie der allgemeinen Gussstückbeschaffenheit,



Bild 118: Durchstrahlungsprüfung eines Gussteils Mühlenboden aus EN-GJS-600-3 (Bild: ZGV, Düsseldorf)



Bild 119: Anlage zum paarweisen Prüfen von PKW-Länglenkern aus GJS mit zehn Magnetisierungskreisen (Bild: K + K Flux-Technic, Mögglingen)

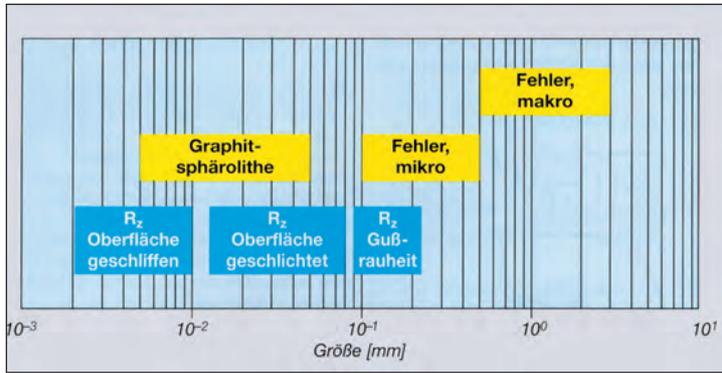


Bild 120: Richtwerte für die gemittelte Rauheit R_z verschiedener Oberflächenzustände von Probestäben im un- und bearbeiteten Zustand (nach [102])

- Prüfungen und Bescheinigungen einschließlich der Stichprobenregelung,
- Vorschriften zum Kennzeichnen der Gusstücke.
- Hinweise für eventuelle Beanstandungen.

Der informative Anhang der Norm enthält eine Checkliste für Vereinbarungen, die zwingend festgelegt werden müssen, und mit wahlfreien Informationen, die zusätzlich vereinbart werden können.

Die **DIN EN 1559 Teil 3** legt weitere spezifische Lieferbedingungen, die zwischen Kunden und Gießerei geregelt werden sollten, für Eisengussstücke einschließlich Gussteile aus dem Werkstoff Gusseisen mit Kugelgraphit fest. Diese betreffen unter anderem:

- vom Käufer anzugebende wahlfreie Informationen über den Rohgusszustand, eine besondere Wärmebehandlung, eine Oberflächenbehandlung der Rohgussstücke, die Einzelheiten zur mechanischen Bearbeitung, die Zeichnungen und Modelle sowie die Musterabwicklung (Vormuster, Erstmuster);
- Schweißungen;

- besondere nicht in den Normen geregelte Anforderungen an Werkstoff und Gussstück;
- Ungültigkeit von Prüfungen;
- Bescheinigungen über die Werkstoffprüfung.

Der Nachweis der Werkstoffeigenschaften erfolgt in der Regel an angegossenen oder getrennt gegossenen Proben, deren Dicke in Beziehung zur maßgebenden Wanddicke des Gussstückes steht. Die jeweiligen Probenformen, die zur Anwendung kommen können, sind in der **DIN EN 1563** beschrieben. Teilweise können aber auch nach vorheriger Vereinbarung Probenentnahmen im Gussstück erfolgen, wobei dann die Mindestwerte festgelegt und der Probenahmeort in der Zeichnung gekennzeichnet werden müssen.

Die Oberflächenbeschaffenheit ist in **DIN EN 1559** nicht quantitativ definiert. Als Basis für verbindliche Festlegungen haben sich im deutschsprachigen Raum die Richtreihen nach der Empfehlung des **CTIF (NO 359-01)** der SCRATA oder nach der **BNIF 359**, einer technischen Empfehlung des Bureau de Normalisation des Industries de la Fonderie, durchgesetzt.



Bild 121: Gefügebestimmung und -kontrolle in einem metallkundlichen Labor einer Eisengießerei (Bild: CLAAS GUSS, Bielefeld)

Hierauf wird inzwischen in einigen Regelwerken zum Beispiel den Normen zur Oberflächenprüfung **DIN EN 1369**, **DIN EN 1370** und **DIN EN 1371** in verbindlicher Form Bezug genommen [101]. Es wird empfohlen, bei besonderen Anforderungen an die Oberflächenbeschaffenheit mit der Gießerei Rücksprache zu nehmen, da dies einen erheblichen Einfluss auf die Herstellkosten haben kann.

Die innere Beschaffenheit ist ebenfalls in **DIN EN 1559** nicht näher definiert und muss unbedingt vereinbart werden, da maximal zulässige Fehlergrößen, wenn keine Fehlergrößen vereinbart sind, wie in der entfallenen **DIN 1690 Teil 1 und 2** erwähnt, nicht festgelegt sind. Die Beurteilung der Beschaffenheit erfolgt über verschiedene Prüfnormen, deren Ergebnisse in Form von Gütestufen klassifiziert werden. Die Gütestufen sind bei der Anfrage und Bestellung zu vereinbaren und in der gültigen Bestellzeichnung zu kennzeichnen.

7.3 Werkstoffprüfung

Die Werkstoffprüfung bei Gusseisen mit Kugelgraphit unterscheidet sich nicht von der entsprechenden Prüfung bei Stahl-

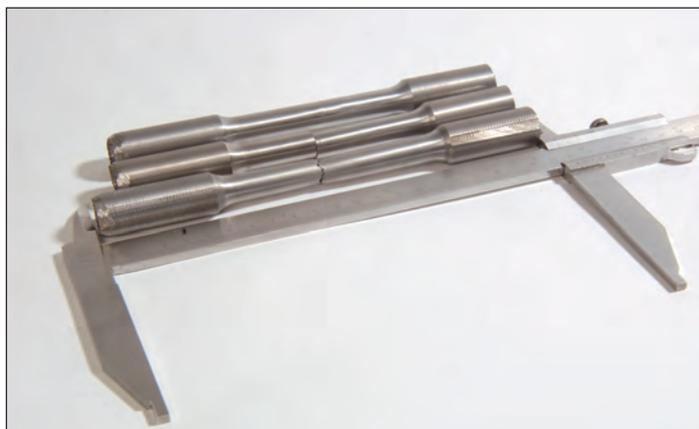


Bild 122: Bestimmung der mechanischen Eigenschaften von Gussteilen aus GJS im Zugversuch mit Hilfe angegossener oder getrennt gegossener Probestäbe (Bild: CLAAS GUSS, Bielefeld)



Bild 123: Kontrolle der Zähigkeitseigenschaften von GJS-Gussteilen im Kerbschlagbiegeversuch im Werkstofflabor einer Gießerei (Bild: CLAAS GUSS, Bielefeld)

guss, Schmiede- oder Walzstählen. Spezifisch ist die Probenahme mit angegossenen, getrennt gegossenen oder dem Gussstück entnommenen Proben. Die Planung aller Werkstoffprüfungen und die Überwachung der Prüfgeräte ist Bestandteil der Qualitätssicherung, die beispielsweise in einem Qualitätsmanagementsystem nach **DIN EN ISO 9001** beschrieben ist

7.3.1 Chemische Analyse

Die chemische Zusammensetzung der Schmelze wird mit physikalischen oder nasschemischen Mitteln bestimmt, zum Beispiel der Emissions-Spektalanalyse oder der Röntgenfluoreszenz-Spektalanalyse. Gasbestimmungen wie Stickstoff- und Sauerstoffgehalte können in Sonderfällen ebenfalls auf physikalischem Weg stattfinden. Ebenfalls in Sonderfällen kann eine Stückanalyse vereinbart werden.

7.3.2 Mechanische Eigenschaften

Die mechanischen Eigenschaften werden nachgewiesen mit:

- dem Zugversuch nach **DIN EN 10002 Teil 1**,
- der Härteprüfung nach Brinell HBW **DIN EN ISO 6506-1**,
- dem Kerbschlag-Biegeversuch nach **DIN EN 10045 Teil 1** (als Nachweis der Zähigkeit bei den Werkstoffsorten EN-GJS-400-18 LT und RT, sowie EN-GJS-350-22 LT und RT).

7.3.3 Metallographische Untersuchungen

Mittels metallographischer Untersuchungen können die Gefügebestandteile Ferrit, Perlit und die Anteile von Carbiden bestimmt werden. Die Beurteilung der Graphitausbildung einschließlich der Graphitgröße wird nach **DIN EN ISO 945** ermittelt, wobei die Prüfbedingungen mit dem Kunden vereinbart werden müssen.

Die Beurteilung der Graphitformen und Graphitgrößen erfolgt entweder mittels subjektiver Beurteilung durch den Metallographen oder durch eine automatische Bildanalyse mit dem Computer.

7.3.4 Zerstörungsfreie Werkstoffprüfung

Die zerstörungsfreien Prüfverfahren dienen dazu, die äußere und innere Beschaffenheit von Gussstücken aus Gusseisen mit Kugelgraphit zu prüfen und zu beurteilen. Eine Übersicht über die Prüfverfahren enthält **Bild 124**. Wichtig für die Durchführung der Prüfungen und Beurteilung der Prüfergebnisse ist qualifiziertes Prüfpersonal und detaillierte allgemeine und auch stückbezogene Prüfanweisungen.

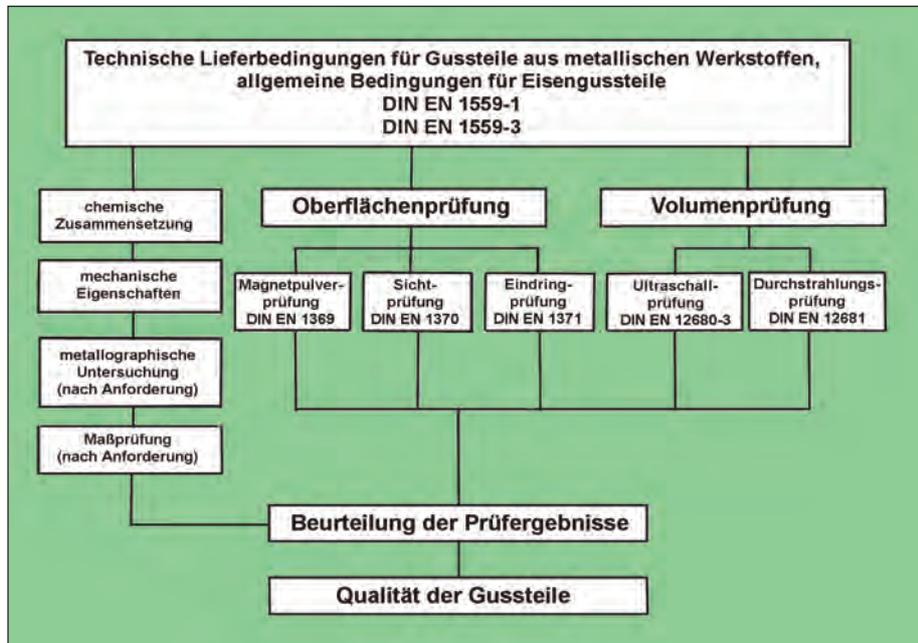


Bild 124: Übersicht über zu vereinbarende Prüfungen für einen Beispielfall



Bild 125: Anlage zur vollautomatischen Magnetpulver-Rissprüfung von Nockenwellen mit Hilfe optoelektrischer Systeme (Bild: K + D Flux-Technic, Mögglingen)

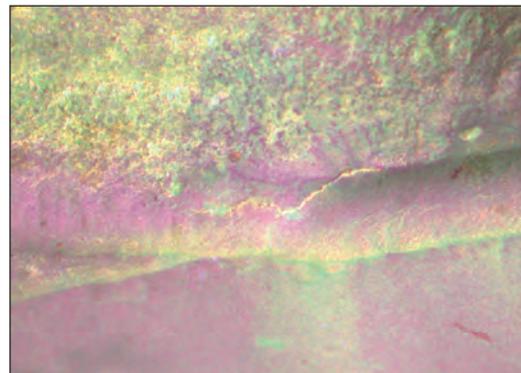


Bild 126: Magnetpulverprüfung eines Gussteils aus EN-GJS-400-15, betrachtet unter UV-Licht (Bild: IfG, Düsseldorf)



Bild 127: Sprühtestversuch zur Bestimmung der Korrosionsbeständigkeit von Gusseisen-teilen gegen Wasser und andere Medien (Bild: CLAAS GUSS, Bielefeld)

8 Mechanische und physikalische Eigenschaften von Gusseisen mit Kugelgraphit

8.1 Eigenschaften bei Raumtemperatur

Die Bezeichnung „Gusseisen mit Kugelgraphit“ leitet sich vom Vorliegen kugelförmiger Graphitausscheidungen in diesen Werkstoffen ab (**Bild 128**). Anders als bei Gusseisen mit Lamellengraphit, bei dem wegen der ausgeprägten Kerbwirkung des Graphits die mechanischen Eigenschaften durch dessen Menge, Verteilung und Form dominiert werden, hat bei Gusseisen mit Kugelgraphit die Ausbildung der metallischen Matrix entscheidenden Einfluss. Die Struktur der metallischen Matrix ist bei den konventionellen, in **DIN EN 1563** genormten Werkstoffen ferritisch, perlitisch oder eine Mischform dieser beiden Grundgefüge (siehe **Bild 13**, Seite 6). Zur Gruppe der Gusseisenwerkstoffe mit Kugelgraphit gehören darüber hinaus auch die in **DIN EN 1564** genormten austenitisch-ferritischen Gusseisen mit Kugelgraphit, auch als ADI bekannt, sowie die in **DIN EN 13835** beschriebenen austenitischen Gusseisen mit Kugelgraphit (siehe Kapitel 10.1).

Je nach Matrixstruktur werden bei den nach **DIN EN 1563** definierten konventionellen un- und niedrig legierten Werkstoffen, die Festigkeitsstufen EN-GJS-350-22 bis EN-GJS-900-2 erreicht. Das ferritische Grundgefüge besteht aus kubisch raumzentriertem α -Eisen. Diese Phase ist sehr zäh und duktil, allerdings durch begrenzte Festigkeit und geringe Härte charakterisiert. Perlit ist eine zeilige Gefügestruktur, die aus abwechselnden Schichten von Ferrit und Zementit (Fe_3C) besteht. Diese Phase ist im Gegensatz zum Ferrit sehr fest und durch eine hohe Härte und einen hohen Verschleißwiderstand gekennzeichnet. Allerdings ist die Verformbarkeit gering. So bildet Ferrit die Basis der duktilen, weniger festen Gusseisensorten, während die härtesten Sorten überwiegend perlitisch sind. Durch Kombination unterschiedlicher Mengenanteile beider Gefüge entstehen die verschiedenen Übergangsqualitäten. Die Werkstoffsorten EN-GJS-800-2 und EN-GJS-900-2 weisen zumeist ein Vergütungsgefüge auf. So decken bereits un- und niedriglegierte Gusseisensorten mit Kugelgraphit eine große Bandbreite von Eigenschaften ab.

Anders als bei anderen Werkstoffgruppen ist die chemische Zusammensetzung von un- und niedrig legiertem Gusseisen mit Kugelgraphit nicht durch die Norm vorge-schrieben. Vielmehr erfolgt die Werkstoffdefinition über die mechanischen Eigen-

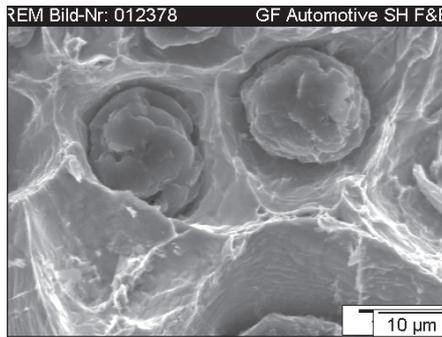


Bild 128: REM-Aufnahme eines duktilen (verformungsreichen) Gewaltbruchs eines GJS-400-15 (Bild: Georg Fischer, Schaffhausen)

schaften, was sich auch in der Werkstoffbezeichnung widerspiegelt. Während über die Bezeichnung GJS die Klassifizierung der Graphitstruktur als Gusseisen mit Kugelgraphit erfolgt, geben die Ziffern im Kurzzeichen die Mindestzugfestigkeit in N/mm² (MPa) sowie den Mindestwert für die Bruchdehnung in getrennt gegossenen Proben an.

Die überwiegend ferritische Sorte EN-GJS-400-18 enthält keine oder nur geringfügige Anteile an Perlit. Sie besitzt bei guter Festigkeit eine hohe Bruchdehnung und ist wegen ihrer niedrigen Härte hervorragend zu bearbeiten. Für den Einsatz bei niedrigen oder stark schwankenden Temperaturen haben sich die ferritischen Sorten mit gewährleisteter Kerbschlagarbeit EN-GJS-350-22-RT oder EN-GJS-350-22-LT beziehungsweise EN-GJS-400-18-RT oder EN-GJS-400-18-LT ausgezeichnet bewährt. Der Zusatz RT bedeutet, dass die Kerbschlagarbeit für Raumtemperatur gewährleistet ist, während bei dem Zusatz LT (= low temperature) die Kerbschlagarbeit für eine Prüfung bei tiefen Temperaturen angegeben ist (siehe Kapitel 8.3).

Für höhere Anforderungen an die Belastbarkeit kann auf die Sorte EN-GJS-450-10 verwiesen werden, die bei immer noch sehr hoher Duktilität eine höhere Festigkeit aufweist. Für noch höhere Festigkeitsanforderungen werden EN-GJS-500-7 und EN-GJS-600-3 verwendet. Neben einer ausreichenden Zähigkeit bieten diese Werkstoffsorten die Gewähr für eine wirt-



Bild 129: Räderkassette für 10 Zylinder-TDI-Motor von VW aus EN-GJS-800-8 (Bild: VCST)

schaftliche spanende Bearbeitung. Darüber hinaus können sie gut randschichtgehärtet werden.

Die Sorten EN-GJS-700-2, EN-GJS-800-2 und EN-GJS-900-2 werden mit Erfolg anstelle von Schmiedestählen gleicher Festigkeitsstufe eingesetzt. Häufig ist der Grund für den Einsatz dieser Sorten der Verschleißwiderstand, der beispielsweise durch lokales Härten in besonders hoch belasteten Bereichen nochmals gesteigert werden kann. Trotz der hohen Festigkeit dieser Werkstoffe sind gute Voraussetzungen für die spanende Bearbeitung gegeben.

Für duktile Rohre (Rohre aus ferritischem Gusseisen mit Kugelgraphit) für Wasser- und Gasleitungen sind nach **DIN EN 545** folgende mechanische Eigenschaften festgelegt:

- Mindestzugfestigkeit: 420 N/mm²;
- Mindestbruchdehnung bei Nenndurchmesser 40 bis 1000 mm: 10 %;
- Mindestbruchdehnung bei Nenndurchmesser 1100 bis 2000 mm: 7 %.

Bei den nach **DIN EN 1564** genormten austenitisch-ferritischen Gusseisensorten, die in der Literatur häufig auch als ADI (Austempered Ductile Iron) bezeichnet werden, wird durch eine nachgeschaltete, separate Wärmebehandlung eine spezielle Mikrostruktur eingestellt. Diese besteht aus lattenförmigem Ferrit, der in einer an Kohlenstoff übersättigten austenitischen Matrix vorliegt. Daher wird diese Struktur in der neueren Literatur auch als „Ausferrit“ bezeichnet. In älteren Veröffentlichungen wurde diese Struktur häufig als „zwischenstufenvergütetes“ oder „bainitisches“ Gusseisen bezeichnet. Anders als bei der bainitischen Struktur von Stahl liegen jedoch bei einem austenitisch-ferritischen Gefüge keine fein verteilten Carbide vor, so dass diese Bezeichnung streng genommen nicht ganz korrekt ist. In **DIN EN 1564** sind vier Sorten genormt, die zu der Werkstoffgruppe gehören. Die wichtigsten Eigenschaften dieser Gusseisensorten sind ebenfalls mit **Tabelle 9** aufgeführt.

Mit ihrem Eigenschaftsprofil stoßen die zähen ADI-Sorten in einen Anwendungsbereich vor, der bisher dem Stahlguss oder den Schmiedestählen vorbehalten war. Im Vergleich zu Stahl hat ADI jedoch wegen seines hohen Graphitanteils eine etwa 10 % geringere Dichte, was diese Werkstoffgruppe auch unter Leichtbaugesichtspunkten attraktiv macht. Das Verhältnis von Festigkeit zu Dichte liegt für ADI-Werkstoffe in einem ähnlichen Bereich wie für viele Aluminiumwerkstoffe. Beispiele zeigen so auch, dass es möglich ist, mit ADI sogar leichtere Bauteile zu realisieren als mit Aluminiumwerkstoffen. Eine ADI-Anwendung aus dem Automobilbereich ist im **Bild 129** gezeigt.

Die Werkstoffe EN-GJS-800-8 und EN-GJS-1000-5 bieten sich aufgrund ihrer hohen Dauerwechselfestigkeit bei hohen Bruchdehnungswerten vor allem für dynamisch hoch beanspruchte Teile an [103]. ADI-Werkstoffe können ihren Vorteil gegenüber konventionellen Gusseisensorten dabei noch stärker bei solchen Bauteilen ausspielen, die variablen Schwingungsamplituden ausgesetzt sind, als bei solchen, auf die eine konstante schwingende Belastung einwirkt [104]. Darüber hinaus sorgen sowohl der Graphit als auch die ausferritische Matrix für eine hervorragende Materialdämpfung, was für viele Anwendungen, wie beispielsweise den Getriebebau, Vorteile bietet. Gegenüber Stahl/Stahl-Zahnradpaarungen haben die ADI/ADI-Paarungen eine signifikant reduzierte Geräuschemission [105, 106].

Die hochfesten ADI-Sorten EN-GJS-1200-2 und EN-GJS-1400-1 finden vor allem dort Einsatz, wo ein hoher Verschleißwiderstand gefordert ist, so zum Beispiel in Bodenbearbeitungsmaschinen des Landmaschinenbaus, in der Erntetechnik, in Baumaschinen oder im Bergbau. Hier treten sie in Konkurrenz zu verschleißbeständigen Stählen oder zu hoch legiertem weißem Gusseisen. Gegenüber diesen Werkstoffen ist ADI jedoch häufig die wirtschaftlichere Lösung. Hinzu kommt im Vergleich zum weißen Gusseisen eine höhere Zähigkeit der ADI-Werkstoffe.

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass die Härte bei einem Vergleich von ADI mit Stahl nicht als alleiniges Maß für den Verschleißwiderstand herangezogen werden kann. Bei gleicher Härte ist der Verschleißwiderstand von ADI vielfach sogar besser als der von Stählen [107]. Ursache hierfür ist die Tatsache, dass ADI bei Verschleißbeanspruchung eine deut-

liche Härtezunahme in der Randschicht zeigt, die ein Fortschreiten des Verschleißes reduziert. Die Härte in der äußersten, der Verschleißbelastung ausgesetzten Schicht ist somit deutlich höher als die Grundhärte des Werkstoffs. Als mögliche Ursachen für die Härtezunahme werden in verschiedenen Literaturstellen unterschiedliche Mechanismen diskutiert. In einigen Quellen wird der Effekt auf eine spannungsinduzierte Martensitumwandlung, in anderen auf eine starke Kaltverfestigung zurückgeführt. Wird die verfestigte Schicht infolge der Verschleißbeanspruchung abgetragen, so verfestigt die darunter liegende Schicht, so dass über die gesamte Lebensdauer des Bauteils ein weitgehend konstantes Verschleißverhalten vorliegt. Weitere Informationen zum Verschleiß von ADI sind in [108, 109] zu finden.

Besonders hoch ist der Verschleißwiderstand von carbidhaltigem ADI, das in der englischen Literatur auch als CADI bezeichnet wird (C = carbidic) [110]. Bei diesen Werkstoffen liegen Sonderkarbide als harte Phase in einer austenitisch-ferritischen Matrix vor. Auf Grund dieser Matrixstruktur weisen diese Werkstoffe eine höhere Zähigkeit auf als weiße verschleißbeständige Gusseisensorten. Die Werkstoffgruppe der carbidischen Gusseisensorten ist allerdings noch nicht genormt.

Die **DIN EN 1563** vom Oktober 2005 definiert neben den Standardwerkstoffen, bei denen die Werkstoffsorte am separat gegossenen Probestab nachgewiesen wird, auch Werkstoffe derselben Kategorien, bei denen jedoch die Mindestwerte für angegossene Proben festgelegt sind. Diese Werkstoffe werden durch den Zusatz U gekennzeichnet. Bei der Festlegung der Mindesteigenschaften wird die Wand-

dickenabhängigkeit der Eigenschaften mit berücksichtigt. Diese ist zwar wesentlich weniger ausgeprägt als beim Gusseisen mit Lamellengraphit, sollte aber insbesondere bei größeren Wanddicken über 60 mm nicht vernachlässigt werden. Durch diese Definition der Sorten ergibt sich einerseits der Vorteil für den Gussabnehmer, dass er auch Sorten bestellen kann, bei denen die Eigenschaften im Gussteil bereits durch die Bestellung besser beschrieben sind, andererseits ergibt sich natürlich eine etwas unübersichtlichere Sortenvielfalt. Diese wird zusätzlich vergrößert durch die verschiedenen Sorten mit bei Raumtemperatur (RT) oder bei tieferen Temperaturen (LT) gewährleisteten Kerbschlagzähigkeiten. Wird in der Werkstoffbezeichnung der Zusatzbuchstabe „C“ verwendet (zum Beispiel EN-GJS-400-15C), weist dies darauf hin, dass die mechanischen Eigenschaften an einer aus dem Gussbauteil entnommenen Probe nachgewiesen wurden. Neben der Definition über die Festigkeit und die Bruchdehnung kann Gusseisen mit Kugelgraphit nach **DIN EN 1563** auch über die Brinellhärte definiert werden.

In den **Tabellen 9** wurde versucht, die verschiedenen Werkstoffsorten nebeneinander darzustellen, um den Überblick zu erleichtern. Allerdings ist es so nicht mehr möglich, alle Werkstoffsorten von Gusseisen mit Kugelgraphit in einer Tabelle darzustellen. Neben den gewährleisteten Eigenschaften wurden in die **Tabelle 9** zahlreiche weitere Eigenschaften mit aufgenommen, welche für den Konstrukteur wichtig sein können, wie zum Beispiel Schwingfestigkeitsdaten, thermische und magnetische Eigenschaften, Festigkeiten bei erhöhten Temperaturen. Diese Eigenschaften sind als Richtwerte zu verstehen, Literaturzitate sind angefügt.

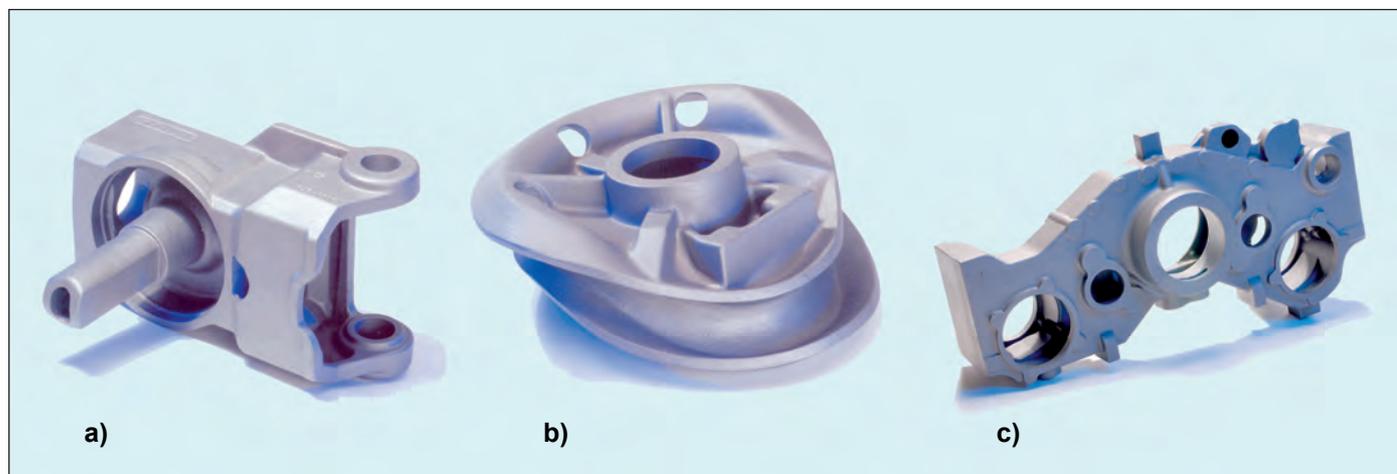


Bild 130: Gusseisen mit Kugelgraphit lässt sich zu komplexen, hoch belastbaren Bauteilen vergießen, die unter anderem im Maschinen- und Motorenbau zum Einsatz kommen (Bild: CLAAS GUSS, Bielefeld)

- a) Getriebegehäuse für eine Landmaschine aus EN-GJS-400-15 (Gewicht 15,57 kg) und aus GJS-500-7 (Gewicht 13,66 kg)
- b) Steuerscheibe zur Kurvenführung in einem Heuschwader aus EN-GJS-600-3 (Gewicht 8,34 kg)
- c) Räderkassette für einen Großdieselmotor aus EN-GJS-400-15

Tabelle 9: Gewährleistete Mindestwerte nach DIN EN 1563 und DIN EN 1564 und weitere Anhaltswerte für die mechanischen und physikalischen Eigenschaften von Gusseisen mit Kugelgraphit (Teil 1: Fortsetzung S. 55 bis 60; Fußnoten am Ende der Tabelle auf S. 61)

Eigenschaften	Werkstoffkurzzeichen Werkstoffnummer EN-...					
	GJS-350-22-LT JS1015	GJS-350-22U-LT JS1019	GJS-350-22-RT JS1014	GJS-350-22U-RT JS1029	GJS-350-22 JS1010	GJS-350-22U JS1032
Gefüge	Ferrit	Ferrit	Ferrit	Ferrit	Ferrit	Ferrit
Zugfestigkeit R_m^1 [N/mm ²]	350		320		350	
Zugfestigkeit R_m^2 [N/mm ²]						
<i>maßgebende Wanddicke:</i>						
bis 30 mm		350		350		350
>30 - 60 mm		330		330		330
>60 - 200 mm		320		320		320
0,2%-Dehngrenze $R_{p0,2}^1$ [N/mm ²]	220		220		220	
0,2%-Dehngrenze $R_{p0,2}^2$ [N/mm ²]						
<i>maßgebende Wanddicke:</i>						
bis 30 mm		220		220		220
>30 - 60 mm		210		220		220
>60 - 200 mm		200		210		210
Bruchdehnung A_5^1 [%]	22		22		22	
Bruchdehnung A_5^2 [%]						
<i>maßgebende Wanddicke:</i>						
bis 30 mm		22		22		22
>30 - 60 mm		18		18		18
> 60 - 200 mm		15		15		15
Brucheinschnürung Z [%]	20 - 35					
Kerbschlagarbeit A_v RT ¹ [J]						
Mittelwert aus drei Prüfungen			17			
Einzelwert			14			
Kerbschlagarbeit A_v -40 °C ¹ [J]						
Mittelwert aus drei Prüfungen	12					
Einzelwert	9					
Kerbschlagarbeit A_v RT ² [J]						
<i>Wanddicke bis 60 mm:</i>						
Mittelwert aus drei Prüfungen				17		
Einzelwert				14		
<i>Wanddicke > 60 - 200 mm:</i>						
Mittelwert aus drei Prüfungen				14		
Einzelwert				12		
Kerbschlagarbeit A_v -40 °C ² [J]						
<i>Wanddicke bis 60 mm:</i>						
Mittelwert aus drei Prüfungen		12				
Einzelwert		9				
Kerbschlagarbeit A_v -40 °C ² [J]						
<i>Wanddicke > 60 - 200 mm:</i>						
Mittelwert aus drei Prüfungen		10				
Einzelwert		7				
Härte HB30 ¹³			< 160			
Elastizitätsmodul E_0 ¹⁴ [kN/mm ²]					169	
Schubmodul G [kN/mm ²]					~ 68	
Querkontraktionszahl ν ¹⁴					0,275	
Torsionsfestigkeit τ_t ¹⁴ [N/mm ²]					315	
0,2%-Torsionsgrenze $\tau_{t0,2}$ [N/mm ²]						
Scherfestigkeit τ_{aB} ¹⁴ [N/mm ²]					315	
Umlaufbiegewechselfestigkeit ungekerbt, Probendmr. 10,6 mm ¹⁴ [N/mm ²]					114	
Umlaufbiegewechselfestigkeit gekerbt ¹⁵ , Probendurchmesser 10,6 mm ¹⁴ [N/mm ²]					114	
Zug-Druck-Wechselfestigkeit σ_{zdw} ⁴ [N/mm ²]					+/- 100	
Biegewechselfestigkeit σ_{bw} ⁶ [N/mm ²]					+/- 185	
Bruchzähigkeit K_{ic} ¹⁴ [N/mm ^{3/2}]					31	
0,2%-Dehngrenze in Abhängigkeit der Temperatur ¹¹ : <i>Wanddicke bis 60 mm:</i>						
150 °C	200					
250 °C	170					
350 °C	140					
Wärmeleitfähigkeit bei 300 °C ¹⁴ [W/K*m]					36,2	
spez. Wärmekapazität 20 - 500 °C ¹⁴ [J/kg*K]					515	
thermischer Längenausdehnungskoeffizient 20 - 400 °C ¹⁴ [µm/m*K]					12,5	
Dichte ¹⁴ [g/dm ³]					7,1	
maximale Permeabilität ¹⁴ [µH/m]					2136	
Hystereseverlust (b = 11 T) ¹⁴ [J/m ³]					600	
spezifischer elektrischer Widerstand ¹⁴ [µO*m]					0,5	

Fortsetzung Tabelle 9	GJS-400-18-LT JS1025	GJS-400-18U-LT JS1049	GJS-400-18-RT JS1024	GJS-400-18U-RT JS1059	GJS-400-18 JS1020
Gefüge	Ferrit	Ferrit	Ferrit	Ferrit	Ferrit
Zugfestigkeit R_m^1 [N/mm ²]	400		400		400
Zugfestigkeit R_m^2 [N/mm ²]					
maßgebende Wanddicke: bis 30 mm		400		400	
>30 - 60 mm		390		390	
>60 - 200 mm		370		370	
0,2%-Dehngrenze $R_{p0,2}^1$ [N/mm ²]	240		250		250
0,2%-Dehngrenze $R_{p0,2}^2$ [N/mm ²]					
maßgebende Wanddicke: bis 30 mm		240		250	
>30 - 60 mm		230		250	
>60 - 200 mm		220		240	
Bruchdehnung A_5^1 [%]	18		18		18
Bruchdehnung A_5^2 [%]					
maßgebende Wanddicke: bis 30 mm		18		18	
>30 - 60 mm		15		15	
> 60 - 200 mm		12		12	
Brucheinschnürung Z [%]	17 - 32				
Kerbschlagarbeit A_V RT ¹ [J]					
Mittelwert aus drei Prüfungen			14		
Einzelwert			11		
Kerbschlagarbeit A_V -20 °C ¹ [J]					
Mittelwert aus drei Prüfungen	12				
Einzelwert	9				
Kerbschlagarbeit A_V RT ² [J]					
Wanddicke $b > 30 - 60$ mm:					
Mittelwert aus drei Prüfungen				14	
Einzelwert				11	
Wanddicke $> 60 - 200$ mm:					
Mittelwert aus drei Prüfungen				12	
Einzelwert				9	
Kerbschlagarbeit A_V -20 °C ² [J]					
Wanddicke $> 30 - 60$ mm:					
Mittelwert aus drei Prüfungen		12			
Einzelwert		9			
Wanddicke $> 60 - 200$ mm:					
Mittelwert aus drei Prüfungen		10			
Einzelwert		7			
Härte HB30 ¹³			130 - 175		
Elastizitätsmodul E_0 ¹⁴ [kN/mm ²]					169
Schubmodul G [kN/mm ²]					~ 68
Querkontraktionszahl ν ¹⁴ [N/mm ²]					0,275
Druckfestigkeit σ_{db} ¹⁴ [N/mm ²]					700
0,2%-Stauchgrenze $\sigma_{d0,2}$ [N/mm ²]					
Torsionsfestigkeit τ_t ^{14,0,2} [N/mm ²]					360
0,2%-Torsionsgrenze $\tau_{t0,2}$ [N/mm ²]					190
Scherfestigkeit τ_{aB} ¹⁴ [N/mm ²]					360
Umlaufbiegewechselfestigkeit ungekerbt, Probendmr. 10,6 mm ¹⁴ [N/mm ²]					195
Umlaufbiegewechselfestigkeit gekerbt ¹⁵ , Probendurchmesser 10,6 mm ¹⁴ [N/mm ²]					122
Zug-Druck-Wechselfestigkeit σ_{zdW} ⁴ [N/mm ²]	+/- 110				
Zug-Druck-Wechselfestigkeit σ_{zdW}^6 ($K_t = 1,05$) ⁵ [N/mm ²]	+/- 20'0				
Biegewechselfestigkeit σ_{bW} [N/mm ²]					
Biegewechselfestigkeit σ_{bW} ($K_t = 1,17$) ⁵ [N/mm ²]					
Biegeschwelfestigkeit σ_{bS} ($K_t = 1,1$) ⁵ [N/mm ²]					
Torsionswechselfestigkeit τ_{tW} ($K_t = 1,0$) ⁷ [N/mm ²]					
Bruchzähigkeit K_{ic} ¹⁴ [N/mm ^{3/2}]					30
Grübchendauerfestigkeit σ_{Hlim} ⁸ [N/mm ²]					
Zahnfußfestigkeit σ_{Flim} ⁸ [N/mm ²]					
Statische Zahnfußfestigkeit σ_{VB} ⁹ [N/mm ²]					
Laufdruck p_{zul} ¹⁰ [N/mm ²]					
0,2%-Dehngrenze in Abhängigkeit der Temperatur ¹¹ :					
Wanddicke bis 60 mm: 150 °C	230				
250 °C	200				
350 °C	160				
Wanddicke 60 -200 mm: 150 °C	210				
250 °C	180				
350 °C	140				
Wärmeleitfähigkeit bei 300 °C ¹⁴ [W/K*m]					36,2
spez. Wärmekapazität 20 - 500 °C ¹⁴ [J/kg*K]					515
therm. Längenausdehnungskoeffizient 20-400 °C ¹⁴ [µm/m*K]					12,5
Dichte ¹⁴ [g/dm ³]					7,1
maximale Permeabilität ¹⁴ [µH/m]					2136
Hystereseverlust ($b = 11$ T) ¹⁴ [J/m ³]					600
spezifischer elektrischer Widerstand ¹⁴ [µO*m]					0,5

Fortsetzung Tabelle 9	GJS-400-18U JS1062	GJS-400-15 JS1030	GJS-450-10 JS1040	GJS-450-10U JS1032	GJS-500-7 JS1050
Gefüge	Ferrit	Ferrit	Ferrit /Perlit	Ferrit /Perlit	Ferrit/Perlit
Zugfestigkeit R_m^1	[N/mm ²]	400	450		500
Zugfestigkeit R_m^2	[N/mm ²]				
maßgebende Wanddicke: bis 30 mm	400			450	
>30 - 60 mm	390			z. v.	
>60 - 200 mm	370			z. v.	
0,2%-Dehngrenze $R_{p0,2}^1$	[N/mm ²]		250	310	320
0,2%-Dehngrenze $R_{p0,2}^2$	[N/mm ²]				
maßgebende Wanddicke: bis 30 mm	250			310	
>30 - 60 mm	250			z. v.	
>60 - 200 mm	240			z. v.	
Bruchdehnung A_5^1	[%]		15	10	7
Bruchdehnung A_5^2	[%]				
maßgebende Wanddicke: bis 30 mm	18			10	
>30 - 60 mm	15			z. v.	
> 60 - 200 mm	12			z. v.	
Brucheinschnürung Z	[%]		15 - 30		7 - 20
Kerbschlagarbeit $A_V RT^1$	[J]				
Mittelwert aus drei Prüfungen					
Einzelwert					
Kerbschlagarbeit $A_V -20\text{ °C}^1$	[J]				
Mittelwert aus drei Prüfungen					
Einzelwert					
Kerbschlagarbeit $A_V RT^2$	[J]				
Wanddicke $b >30 - 60\text{ mm}$:					
Mittelwert aus drei Prüfungen					
Einzelwert					
Wanddicke $> 60 - 200\text{ mm}$:					
Mittelwert aus drei Prüfungen					
Einzelwert					
Kerbschlagarbeit $A_V -20\text{ °C}^2$	[J]				
Wanddicke $>30 - 60\text{ mm}$:					
Mittelwert aus drei Prüfungen					
Einzelwert					
Wanddicke $> 60 - 200\text{ mm}$:					
Mittelwert aus drei Prüfungen					
Einzelwert					
Härte HB30 ¹³		135 - 180	160 - 210		170 - 230
Elastizitätsmodul E_0^{14}	[kN/mm ²]		169		169
Schubmodul G	[kN/mm ²]		~ 68		~ 68
Querkontraktionszahl ν^{14}	[N/mm ²]		0,275		0,275
Druckfestigkeit σ_{db}^{14}	[N/mm ²]		700		800
0,2%-Stauchgrenze $\sigma_{d0,2}$	[N/mm ²]				350
Torsionsfestigkeit τ_t^{14}	[N/mm ²]		405		450
0,2%-Torsionsgrenze $\tau_{t0,2}$	[N/mm ²]				230
Scherfestigkeit τ_{ab}^{14}	[N/mm ²]		405		450
Umlaufbiegewechselfestigkeit ungekerbt,	[N/mm ²]		210		224
Probendmr. 10,6 mm ¹⁴			128		134
Umlaufbiegewechselfestigkeit gekerbt ¹⁵ ,	[N/mm ²]				
Probendurchmesser 10,6 mm ¹⁴					
Zug-Druck-Wechselfestigkeit σ_{zdW}^4	[N/mm ²]		+/- 110		+/- 150
Zug-Druck-Wechselfestigkeit σ_{zdW}^5 ($K_t = 1,05$) ⁵	[N/mm ²]		+/- 218		+/- 220
Biegewechselfestigkeit σ_{bW}^4	[N/mm ²]		+/- 200		
Biegewechselfestigkeit σ_{bW} ($K_t = 1,17$) ⁵	[N/mm ²]		+/- 211		
Biegeschwelfestigkeit σ_{bS} ($K_t = 1,1$) ⁵	[N/mm ²]		+/- 177		
Torsionswechselfestigkeit τ_{tW} ($K_t = 1,0$) ⁷	[N/mm ²]		+/- 200		
Bruchzähigkeit K_{ic}^{14}	[N/mm ² ·m]			23	25
Grübchendauerfestigkeit $\sigma_{H\lim}^8$	[N/mm ²]		440		500
Zahnfußfestigkeit $\sigma_{F\lim}^8$	[N/mm ²]		175		185
Statische Zahnfußfestigkeit σ_{vB}^9	[N/mm ²]		990		1290
Laufradpressung p_{zul}^{10}	[N/mm ²]		3,6		4,5
0,2%-Dehngrenze in Abhängig-	[N/mm ²]				
keit der Temperatur ¹¹ :					
Wanddicke bis 60 mm: 150 °C			230		290
250 °C			200		250
350 °C			160		200
Wanddicke 60 -200 mm: 150 °C			210		240
250 °C			180		200
350 °C			150		160
Wärmeleitfähigkeit bei 300 °C ¹⁴	[W/K*m]			36,2	35,2
spez. Wärmekapazität 20 - 500 °C ¹⁴	[J/kg*K]			515	515
therm. Längenausdehnungskoeffizient 20-400 °C ¹⁴	[µm/m*K]			12,5	12,5
Dichte ¹⁴	[g/dm ³]			7,1	7,1
maximale Permeabilität ¹⁴	[µH/m]			2136	1596
Hystereseverlust (b = 11 T) ¹⁴	[J/m ³]			600	1345
spezifischer elektrischer Widerstand ¹⁴	[µO*m]			0,5	0,51

Fortsetzung Tabelle 9		GJS-500-7U JS1082	GJS-600-3 JS1060	GJS-600-3U JS1092	GJS-700-2 JS1070	GJS-700-2U JS1102
Gefüge		Ferrit/Perlit	Ferrit/Perlit 600	Ferrit/Perlit	Perlit 700	Perlit
Zugfestigkeit R_m^1	[N/mm ²]					
Zugfestigkeit R_m^2	[N/mm ²]					
<i>maßgebende Wanddicke:</i> bis 30 mm		500		600		700
>30 - 60 mm		450		600		700
>60 - 200 mm		120		550		660
0,2%-Dehngrenze $R_{p0,2}^1$	[N/mm ²]		370		420	
0,2%-Dehngrenze $R_{p0,2}^2$	[N/mm ²]					
<i>maßgebende Wanddicke:</i> bis 30 mm		320		370		420
>30 - 60 mm		300		360		400
>60 - 200 mm		290		340		380
Bruchdehnung A_5^1	[%]		3		2	
Bruchdehnung A_5^2	[%]					
<i>maßgebende Wanddicke:</i> bis 30 mm		7		3		2
>30 - 60 mm		7		2		2
>60 - 200 mm		5		1		1
Brucheinschnürung Z	[%]		3 - 8		2 - 6	
Kerbschlagarbeit A_v RT ¹	[J]					
Mittelwert aus drei Prüfungen						
Einzelwert						
Kerbschlagarbeit A_v -20 °C ¹	[J]					
Mittelwert aus drei Prüfungen						
Einzelwert						
Kerbschlagarbeit A_v RT ²	[J]					
<i>Wanddicke b >30 - 60 mm:</i>						
Mittelwert aus drei Prüfungen						
Einzelwert						
<i>Wanddicke > 60 - 200 mm:</i>						
Mittelwert aus drei Prüfungen						
Einzelwert						
Kerbschlagarbeit A_v -20 °C ²	[J]					
<i>Wanddicke >30 - 60 mm:</i>						
Mittelwert aus drei Prüfungen						
Einzelwert						
<i>Wanddicke > 60 - 200 mm:</i>						
Mittelwert aus drei Prüfungen						
Einzelwert						
Härte HB30 ¹³			190 - 270		225 - 305	
Elastizitätsmodul E_0 ¹⁴	[kN/mm ²]		174		176	
Schubmodul G	[kN/mm ²]		~ 70		~ 70	
Querkontraktionszahl ν ¹⁴	[N/mm ²]		0,275		0,275	
Druckfestigkeit σ_{db} ¹⁴	[N/mm ²]		870		1000	
0,2%-Stauchgrenze $\sigma_{d0,2}$	[N/mm ²]		460		540	
Torsionsfestigkeit τ_t ¹⁴	[N/mm ²]		540		630	
0,2%-Torsionsgrenze $\tau_{t0,2}$	[N/mm ²]		300		330	
Scherfestigkeit τ_{ab} ¹⁴	[N/mm ²]		540		630	
Umlaufbiegewechselfestigkeit ungekerbt, Probendmr. 10,6 mm ¹⁴	[N/mm ²]		248		280	
Umlaufbiegewechselfestigkeit gekerbt ¹⁵ , Probendurchmesser 10,6 mm ¹⁴	[N/mm ²]		149		168	
Zug-Druck-Wechselfestigkeit σ_{zdw} ⁴	[N/mm ²]		+/- 175		+/- 200	
Zug-Druck-Wechselfestigkeit $\sigma_{zdw} (K_t = 1,05)$ ⁵	[N/mm ²]		+/- 259			
Biege-wechselfestigkeit σ_{bw}	[N/mm ²]		+/- 173			
Biege-wechselfestigkeit $\sigma_{bw} (K_t = 1,17)$ ⁵	[N/mm ²]		+/- 250			
Biegeschwefestigkeit $\sigma_{bs} (K_t = 1,1)$ ⁵	[N/mm ²]		+/-259		+/- 280	
Torsionswechselfestigkeit $\tau_{tw} (K_t = 1,0)$ ⁷	[N/mm ²]		+/- 202			
Bruchzähigkeit K_{ic} ¹⁴	[N/mm ² √m]		+/- 250		+/- 300	
Grübchendauerfestigkeit σ_{Hlim} ⁸	[N/mm ²]		20		15	
Zahnfußfestigkeit σ_{Flim} ⁸	[N/mm ²]		535		570	
Statische Zahnfußfestigkeit σ_{vB} ⁹	[N/mm ²]		195		210	
Laufdruck p_{zul} ¹⁰	[N/mm ²]		1300		1320	
0,2%-Dehngrenze in Abhängig- keit der Temperatur ¹¹ :	[N/mm ²]		5,6		6,5	
<i>Wanddicke bis 60 mm:</i> 150 °C			340		390	
250 °C			300		350	
350 °C			220		280	
<i>Wanddicke 60 -200 mm:</i> 150 °C			290		330	
250 °C			260		300	
350 °C			190		250	
Wärmeleitfähigkeit bei 300 °C ¹⁴	[W/K*m]		32,5		31,1	
spez. Wärmekapazität 20 - 500 °C ¹⁴	[J/kg*K]		515		515	
therm. Längenausdehnungskoeffizient 20-400 °C ¹⁴	[µm/m*K]		12,5		12,5	
Dichte ¹⁴	[g/dm ³]		7,2		7,2	
maximale Permeabilität ¹⁴	[µH/m]		866		501	
Hystereseverlust (b = 11 T) ¹⁴	[J/m ³]		2248		2700	
spezifischer elektrischer Widerstand ¹⁴	[µO*m]		0,53		0,54	

Fortsetzung Tabelle 9	GJS-800-2 JS1080	GJS-800-2U JS1112	GJS-900-2 JS1090	GJS-900-2U JS1122
Gefüge	Perlit oder 800	Vergütungsgefüge	Vergütungsgefüge 900	Vergütungsgefüge
Zugfestigkeit R_m^1 Zugfestigkeit R_m^2 <i>maßgebende Wanddicke:</i> bis 30 mm >30 - 60 mm >60 - 200 mm	[N/mm ²] [N/mm ²]		800 z. v. z. v.	900 z. v. z. v.
0,2%-Dehngrenze $R_{p0,2}^1$ 0,2%-Dehngrenze $R_{p0,2}^2$ <i>maßgebende Wanddicke:</i> bis 30 mm >30 - 60 mm >60 - 200 mm	[N/mm ²] [N/mm ²]	480	600	600
Bruchdehnung A_5^1 Bruchdehnung A_5^2 <i>maßgebende Wanddicke:</i> bis 30 mm >30 - 60 mm > 60 - 200 mm	[%] [%]	2	2	2
Brucheinschnürung Z	[%]	2 - 4		
Kerbschlagarbeit A_K RT ¹ Mittelwert aus drei Prüfungen Einzelwert	[J]			
Kerbschlagarbeit A_K -20 °C ¹ Mittelwert aus drei Prüfungen Einzelwert	[J]			
Kerbschlagarbeit A_K RT ² <i>Wanddicke b >30 - 60 mm:</i> Mittelwert aus drei Prüfungen Einzelwert <i>Wanddicke > 60 - 200 mm:</i> Mittelwert aus drei Prüfungen Einzelwert	[J]			
Kerbschlagarbeit A_K -20 °C ² <i>Wanddicke >30 - 60 mm:</i> Mittelwert aus drei Prüfungen Einzelwert <i>Wanddicke > 60 - 200 mm:</i> Mittelwert aus drei Prüfungen Einzelwert	[J]			
Härte HB30 ¹³	245 - 335		270 - 360	
Elastizitätsmodul E_0 ¹⁴	[kN/mm ²] 176		176	
Schubmodul G	[kN/mm ²] ~ 70		~ 70	
Querkontraktionszahl ν ¹⁴	[N/mm ²] 0,275		0,275	
Druckfestigkeit σ_{db} ¹⁴	[N/mm ²] 1150			
0,2%-Stauchgrenze $\sigma_{d0,2}$	[N/mm ²] 690		810	
Torsionsfestigkeit τ_t ¹⁴	[N/mm ²] 720			
0,2%-Torsionsgrenze $\tau_{t0,2}$	[N/mm ²] 720		810	
Scherfestigkeit τ_{aB} ¹⁴	[N/mm ²] +/-304		+/-317	
Umlaufbiegewechselfestigkeit ungekerbt, Probendmr. 10,6 mm ¹⁴	[N/mm ²]			
Umlaufbiegewechselfestigkeit gekerbt ¹⁵ , Probendurchmesser 10,6 mm ¹⁴	[N/mm ²]	+/-182	+/-190	
Zug-Druck-Wechselfestigkeit σ_{zdW} ⁴	[N/mm ²]	+/- 200		
Zug-Druck-Wechselfestigkeit σ_{zdW} ($K_t = 1,05$) ⁵	[N/mm ²]	+/- 300		
Biegewechselfestigkeit σ_{bW} ⁶	[N/mm ²]	+/- 262		
Biegewechselfestigkeit σ_{bW} ($K_t = 1,17$) ⁵	[N/mm ²]	+/- 202		
Biegeschwelfestigkeit σ_{bS} ($K_t = 1,1$) ⁵	[N/mm ²]			
Torsionswechselfestigkeit τ_{tW} ($K_t = 1,0$) ⁷	[N/mm ²]			
Bruchzähigkeit K_{ic} ¹⁴	[N/mm ² ·m] 14		14	
Grüchendauerfestigkeit σ_{Hlim} ⁸	[N/mm ²] 640			
Zahnfußfestigkeit σ_{Flim} ⁸	[N/mm ²] 225			
Statische Zahnfußfestigkeit σ_{VB} ⁹	[N/mm ²] 1400			
Laufdruck p_{zul} ¹⁰	[N/mm ²]			
0,2%-Dehngrenze in Abhängig- keit der Temperatur ¹¹ : <i>Wanddicke bis 60 mm:</i> 150 °C 250 °C 350 °C <i>Wanddicke 60 -200 mm:</i> 150 °C 250 °C 350 °C	[N/mm ²]			
Wärmeleitfähigkeit bei 300 °C ¹⁴	[W/K*m] 31,1		31,1	
spez. Wärmekapazität 20 - 500 °C ¹⁴	[J/kg*K] 515		515	
therm. Längenausdehnungskoeffizient 20-400 °C ¹⁴	[µm/m*K] 12,5		12,5	
Dichte ¹⁴	[g/dm ³] 7,2		7,2	
maximale Permeabilität ¹⁴	[µH/m] 501		501	
Hystereseverlust (b = 11 T) ¹⁴	[J/m ³] 2700		2700	
spezifischer elektrischer Widerstand ¹⁴	[µO*m] 0,54		0,54	

Fortsetzung Tabelle 9	GJS-800-8 ¹⁶ J1100	GJS-1000-5 ¹⁶ JS1110	GJS-1200-2 ¹⁶ JS1120	GJS-1400-1 ¹⁶ JS1130
Gefüge		Ausferrit und Austenit		
Zugfestigkeit R_m^1 [N/mm ²]	800	1000	1200	1400
Zugfestigkeit R_m^2 [N/mm ²]				
maßgebende Wanddicke: bis 30 mm				
>30 - 60 mm				
>60 - 200 mm				
0,2%-Dehngrenze $R_{p0,2}^1$ [N/mm ²]	500	700	850	1100
0,2%-Dehngrenze $R_{p0,2}^2$ [N/mm ²]				
maßgebende Wanddicke: bis 30 mm				
>30 - 60 mm				
>60 - 200 mm				
Bruchdehnung A_5^1 [%]	8	5	2	1
Bruchdehnung A_5^2 [%]				
maßgebende Wanddicke: bis 30 mm				
>30 - 60 mm				
> 60 - 200 mm				
Brucheinschnürung Z [%]				
Kerbschlagarbeit A_v RT ¹ [J]				
Mittelwert aus drei Prüfungen	10			
Einzelwert	9			
Kerbschlagarbeit A_v -20 °C ¹ [J]				
Mittelwert aus drei Prüfungen				
Einzelwert				
Kerbschlagarbeit A_v RT ² [J]				
Wanddicke $b > 30 - 60$ mm:				
Mittelwert aus drei Prüfungen				
Einzelwert				
Wanddicke $> 60 - 200$ mm:				
Mittelwert aus drei Prüfungen				
Einzelwert				
Kerbschlagarbeit A_v -20 °C ² [J]				
Wanddicke $> 30 - 60$ mm:				
Mittelwert aus drei Prüfungen				
Einzelwert				
Wanddicke $> 60 - 200$ mm:				
Mittelwert aus drei Prüfungen				
Einzelwert				
Härte HB30 ¹³	260 - 320	300 - 360	340 - 440	380 - 480
Elastizitätsmodul E_0 (Zug u. Druck) ¹⁷ [kN/mm ²]	170	168	167	165
Schubmodul G [kN/mm ²]	65	64	63	62
Querkontraktionszahl ν ¹⁴ [N/mm ²]				
Druckfestigkeit σ_{ob} ¹⁷ [N/mm ²]	1300	1600	1900	2200
0,2%-Stauchgrenze $\sigma_{s0,2}$ ¹⁶ [N/mm ²]	620	770	1040	1220
Torsionsfestigkeit τ_t ^{17,20,2} [N/mm ²]	720	900	1080	1260
0,2%-Torsionsgrenze $\tau_{t0,2}$ [N/mm ²]	350	490	590	770
Scherfestigkeit τ_{ab} ¹⁷ [N/mm ²]	720	900	1080	1260
Umlaufbiegewechselfestigkeit ungekerbt, Probendmr. 10,6 mm ¹⁷ [N/mm ²]	375	425	450	375
Umlaufbiegewechselfestigkeit gekerbt ¹⁷ , Probendurchmesser 10,6 mm ¹⁷ [N/mm ²]	225	260	280	275
Zug-Druck-Wechselfestigkeit σ_{zdW} ⁴ [N/mm ²]				
Zug-Druck-Wechselfestigkeit σ_{zdW}^6 ($K_t = 1,05$) ⁵ [N/mm ²]				
Biegewechselfestigkeit σ_{bW} [N/mm ²]				
Biegewechselfestigkeit σ_{bW} ($K_t = 1,17$) ⁵ [N/mm ²]				
Biegeschwelfestigkeit σ_{bS} ($K_t = 1,1$) ⁵ [N/mm ²]				
Torsionswechselfestigkeit τ_{tW} ($K_t = 1,0$) ⁷ [N/mm ²]				
Bruchzähigkeit K_{ic} ¹⁷ [N/mm ² √m]	62	58	54	50
Grübchendauerfestigkeit σ_{Hlim} ⁸ [N/mm ²]				
Zahnfußfestigkeit σ_{Flim} ¹⁸ [N/mm ²]		235	310	250
Statische Zahnfußfestigkeit σ_{vB} ¹⁸ [N/mm ²]		1280	1940	1940
Laufdruck p_{zul} ¹⁰ [N/mm ²]				
0,2%-Dehngrenze in Abhängigkeit der Temperatur ¹¹ :				
Wanddicke bis 60 mm: 150 °C				
250 °C				
350 °C				
Wanddicke 60 -200 mm: 150 °C				
250 °C				
350 °C				
Wärmeleitfähigkeit bei 300 °C ¹⁷ [W/K*m]	22,1	21,8	21,5	21,2
spez. Wärmekapazität 20 - 500 °C ¹⁷ [J/kg*K]				
them. Längenausdehnungskoeffizient 20-400 °C ¹⁷ [μm/m*K]	14,6	14,3	14,0	13,8
Dichte ¹⁷ [g/dm ³]	7,1	7,1	7,1	7,1
maximale Permeabilität ¹⁴ [μH/m]				
Hystereseverlust ($b = 11$ T) ¹⁴ [J/m ²]				
spezifischer elektrischer Widerstand ¹⁴ [μO*m]				

Fortsetzung Tabelle 9: Legende und Fußnoten

- ¹ nach DIN EN 1563 gewährleistete Werte für getrennt gegossene Probestücke
 - ² nach DIN EN 1563 gewährleistete Werte aus angegossenen Probestücken
 - ³ Richter, F.: Giess.-Forsch. 37 (1985) H. 3, S. 97 - 102
 - ⁴ Hänchen, R.: Dauerfestigkeitsschaubilder für Stahl und Gusseisen. C. Hanser-Verlag München 1964
 - ⁵ Hück, M, W. Schütz u. H. Walter: ATZ 86 (1984) H. 7/8, S. 325 - 331 und H. 9, S. 385 - 388
 - ⁶ Gilbert, G. N. J.: BCIRA-Report 1160. Alvechurch, Birmingham 1974
 - ⁷ Hornung, K., u. A. Rist: Material und Technik 2 (1974) H. 2, S. 63 - 68
 - ⁸ nach DIN 3990 Teil 5, gültig für Werkstoffqualität MQ
 - ⁹ Niemann, G., u. H. Winter: Maschinenelement Bd. II, 2. Aufl., Springer-Verlag 1983
 - ¹⁰ nach DIN 15 070
 - ¹¹ nach AD-2000-Merkblatt, W 3/2, 2003
 - ¹² nach DIN EN 1564 gewährleistete Werte für getrennt gegossene Probestücke
 - ¹³ in Anlehnung an DIN EN 1563, Einteilung nach Härte (informativ)
 - ¹⁴ Richtwerte nach DIN EN 1563, Anhang B (informativ)
 - ¹⁵ 45°-Spitzkerbe mit $r = 0,25 \text{ mm}$
 - ¹⁶ austenitisch-ferritische Sorten (ADI) nach DIN EN 1564
 - ¹⁷ ADI- The benchmark engineering material: Sonderdruck der CAIF d. i. Group, 2002
 - ¹⁸ Hasse, S.: Duktiles Gusseisen. Schiele & Schön, Berlin 1996
- z. v. - mit Gießerei zu vereinbaren

Für ADI-Werkstoffe sind Anhaltswerte für eine Vielzahl von mechanischen und physikalischen Eigenschaften in **ISO 17804** zusammengestellt. Zwar weichen die Werkstoffdefinitionen hier leicht von den in **DIN EN 1564** festgelegten Sorten ab, dennoch sind dort für den Konstrukteur wichtige Hinweise zu finden. Weiterführende Informationen zu ADI-Werkstoffen sind in [111] zu finden.

Die Entwicklung von Werkstoffen ist bei weitem nicht abgeschlossen, sondern es wird stetig hieran weitergearbeitet, und so gibt es außer den genormten Sorten beim

Gusseisen mit Kugelgraphit auch eine Reihe von jüngeren Sonderwerkstoffen, deren garantierte Mindesteigenschaften in bestimmten Bereichen deutlich über die der Standardwerkstoffe hinaus gehen. Das für Fahrwerksteile entwickelte Sibo-Dur [112] gehört ebenso in diese Gruppe wie der für Kugelstangen eingesetzte Werkstoff „GJS-520-12“ oder der im Getriebebau verwendete Sonderwerkstoff „GJS-620-7“.

Wie in Kapitel 3 beschrieben, kann Gusseisen mit Kugelgraphit nicht nur im Formguss, sondern auch im Strangguss ver-



Bild 132: Teile aus Gusseisen mit Kugelgraphit können in vielen Fällen mehrteilige Fügekonstruktionen durch ein Integralgussteil ersetzen, wie bei dem Wasserkasten für eine Schwing-Autopumpe, wo das Gussteil (links) eine mehrteilige Schweißkonstruktion (rechts) ersetzt (Bild: Olsberg Hermann Everken)

gossen werden (**Bild 133**). Für den Strangguss existiert derzeit keine eigene Norm. Generell erfolgt die Bezeichnung der Sorten nach **DIN EN 1560** analog zu denen für den Sandguss, also nach der Zugfestigkeit und der Bruchdehnung oder nach der Brinellhärte. Anders als beim Sandguss werden die Werkstoffeigenschaften jedoch nicht an einem separat gegossenen Probestab ermittelt, sondern immer an Proben, die an genau festgelegten Stellen aus dem Strang entnommen wurden, was in der Werkstoffbezeichnung durch den Zusatz C zum Ausdruck kommt. Wie auch beim Sandguss sind die mechanischen Eigenschaften von Stranggussprodukten aus Gusseisen mit Kugelgraphit wandstärkenabhängig. Werte sind in [34] enthalten.

Verfahrensbedingt ergeben sich jedoch auf Grund der hohen Abkühlrate andere mechanische Eigenschaften als im Sandguss. So werden im Gusszustand ohne ein nachgeschaltetes Glühen bei einer Festigkeit von 400 N/mm^2 lediglich 7 % Bruchdehnung erreicht, da sich wegen der hohen Abkühlgeschwindigkeit ein höherer Perlitgehalt als im Sandguss einstellt. Dieser kann durch eine Wärmebehandlung weitgehend beseitigt werden, wodurch die Bruchdehnung dann steigt.

Umfassende Informationen über die Eigenschaften von GJS enthält die Quelle [46].



Bild 133: Strangguss kommt wegen seiner hohen Dichtigkeit bei Hydraulikgussteilen zum Einsatz (von links nach rechts: gegossene Stange im Rohzustand, vorbereitete und gebrochtes Bauteil) (Bild: Gontermann-Peipers, Siegen)

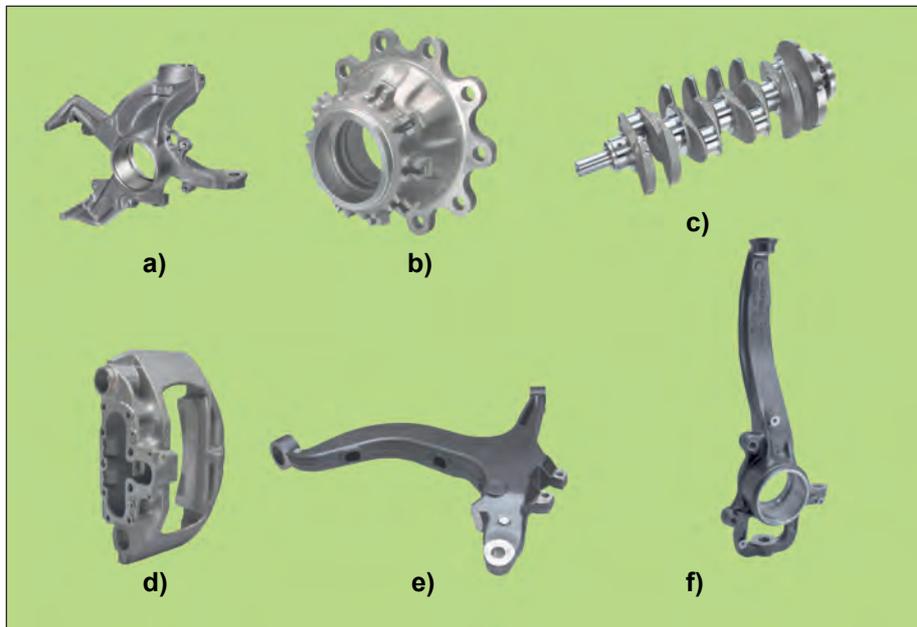


Bild 131 : Hochbeanspruchte Sicherheitsbauteile an Automobilen sind ein spezielles Einsatzgebiet des Gusseisens mit Kugelgraphit (Bild: Georg Fischer Automotive, Schaffhausen)

- a) Schwenklager für PKW aus EN-GJS-400-15, Gewicht 5,0 kg
- b) Radnabe für NKW aus EN-GJS-600-3, Gewicht 28,2 kg
- c) Kurbelwelle für PKW aus EN-GJS-700-2, Gewicht 15,2 kg
- d) Bremssattel für NKW aus EN-GJS-500-7, Gewicht 19,2 kg
- e) Querlenker für NKW (EVO-Bus mit Einzelradaufhängung) aus EN-GJS-400-15, Gewicht 34,0 kg
- f) Langarmschwenklager für Hochleistungs-SUV aus EN-GJS-400-15, Gewicht 8,4 kg

8.2 Eigenschaften bei erhöhten Temperaturen

Die Auswahl von Gusseisenwerkstoffen für den Einsatz bei erhöhten Temperaturen erfolgt im Wesentlichen unter den Gesichtspunkten der mechanischen Temperatur abhängigen Eigenschaften, der Beständigkeit gegen das Zundern, der Beständigkeit gegen das Wachsen und das Verändern des Gefüges und damit der Eigenschaften sowie der Temperaturwechselbeständigkeit.

8.2.1 Zundern

Das Zundern von unlegiertem Gusseisen mit Kugelgraphit beginnt bereits bei 250 °C, ist jedoch bis zu Temperaturen von etwa 400 °C so unbedeutend, dass es praktisch vernachlässigt werden kann. Nach zwanzig Jahren beträgt die Gewichtszunahme nur etwa 3 mg/cm². Auch das geringe Zundern bei 450 °C stellt selten ein Problem dar. Ein Erhöhen der Temperatur auf 500 °C führt nach **Bild 134** zu einem Verdoppeln der Verzunderungsrate, die aber noch immer relativ niedrig ist. Eine weitere Temperatursteigerung auf 550 °C verdoppelt erneut die Verzunderungsrate. Sie steigt bei noch höheren Temperaturen sehr rasch an. Das Zunderverhalten von Gusseisen mit Kugelgraphit in anderen oxidierenden Gasen ist dem hier beschriebenen Verhalten in Luft sehr ähnlich. Der Einfluss des Grundgefüges auf die Zunderbeständigkeit ist gering und vermindert sich mit steigender

Temperatur. Das gilt auch mit Ausnahme des Siliciumgehaltes für die chemische Zusammensetzung.

Durch Erhöhen des Siliciumgehaltes lässt sich die Zunderbeständigkeit deutlich steigern. Ab 4 % Silicium ist Gusseisen mit Kugelgraphit praktisch zunderbeständig. Mit 4 bis 5 % Silicium ähneln die mechanischen Eigenschaften von ferritischem GJS denjenigen von EN-GJS-600-3. Silicium legiertes zunderbeständiges Gusseisen mit Kugelgraphit ist stets ferritisch. Es kann bis zu der Temperatur eingesetzt werden, bei der die Ferrit-Austenit-Umwandlung beginnt. Wird diese Temperatur überschritten, so treten im Gefüge Volumenänderungen auf, die die schützende Zunderschicht aufreißen und Mikrorisse erzeugen, so dass der Oxidationsangriff erheblich beschleunigt wird. Gusseisen mit Kugelgraphit mit rund 4 % Si kann bis zu etwa 800 bis 820 °C eingesetzt werden, mit 5 % Si bis zu knapp 900 °C und mit 6 % Si bis 950 °C [116].

8.2.2 Wachsen

Die Volumenzunahme - das sogenannte Wachsen - von Gusseisenwerkstoffen bei längerem Halten oberhalb etwa 450 °C hat zwei Ursachen. Die eine ist der Zerfall des im Perlit oder als freier Zementit (Eisencarbid Fe₃C) vorhandenen gebundenen Kohlenstoffs zu Graphit und Ferrit, die zweite ist die innere Oxidation, bei der Sauerstoff vor allem entlang des Graphits ins Werkstoffinnere vordringt, wobei die sich bildenden Oxide den Werkstoff aufblähen.

Gegen innere Oxidation ist Gusseisen mit Kugelgraphit weitgehend immun, da die Graphitkugeln nicht wie die Graphitlamellen beim Gusseisen mit Lamellengraphit zusammenhängen. Daher kann innere Oxidation nur an Oberflächenfehlern auftreten und äußert sich vorwiegend in Form von Blasen oder pickelartigen Aufwölbungen an der Oberfläche.

Die Volumenbeständigkeit von Gusseisen mit Kugelgraphit hängt vor allem von der Menge und der Stabilität des Perlits ab. So sind ferritische Sorten praktisch Wachstum beständig, rein perlitische können durch Zerfall des Perlits linear um 0,4 bis 0,5 % wachsen, was einer Volumenzunahme von 1,2 bis 1,5 % entspricht. Ist außerdem freier Zementit vorhanden, dann ist die Volumenzunahme entsprechend größer. Warmfeste, mit Molybdän legierte Sorten enthalten häufig einen geringen Anteil gebundenen Kohlenstoffs in Form von molybdänreichen Carbiden. Diese sind im Gegensatz zu Eisencarbid (Fe₃C, Zementit) thermisch stabil, so dass ein derartiges Gusseisen mit Kugelgraphit Wachstum beständig ist, sofern die übrige Grundmasse völlig ferritisch ist.

Der Perlitzerfall und damit das Wachsen von unlegiertem Gusseisen mit Kugelgraphit beginnt bereits bei etwa 450 °C und nimmt mit steigender Temperatur rasch zu [113]. Er lässt sich durch das zum Einstellen eines perlitischen Gefüges bei EN-GJS-600-3 oder EN-GJS-700-2 verwendete Legierungselement Kupfer nicht verlang-

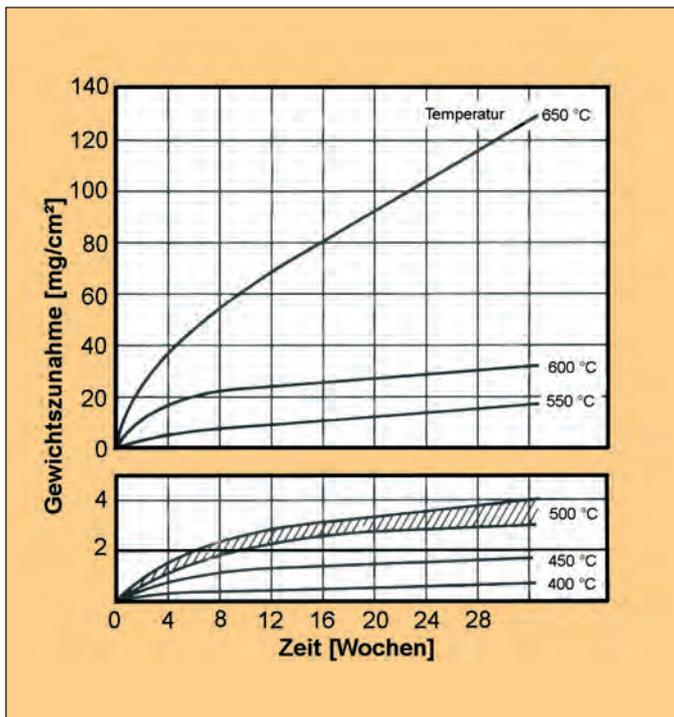


Bild 134: Verzunderung von ferritischem und perlitischem GJS mit 1,7 bis 2,0 % Si an Luft von 400 bis 650 °C (nach [113 - 115])

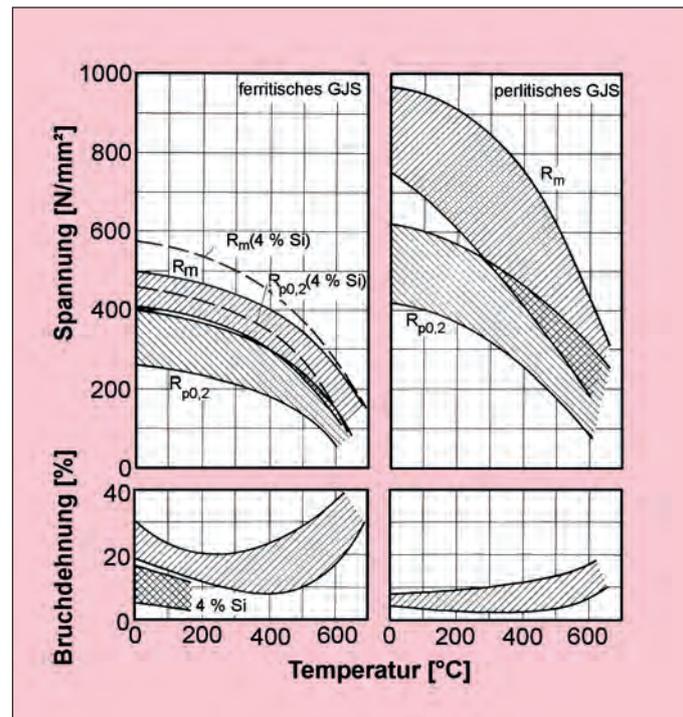


Bild 135: Streubänder der mechanischen Eigenschaften von ferritischem und perlitischem GJS in Abhängigkeit von der Temperatur (nach [117, 118])

samen. Dies ist nur möglich durch niedrige Silicium- und Kohlenstoffgehalte, die Verwendung eines an Spurenelementen reichen Einsatzmaterials, den Zusatz von 0,1 % Zinn oder das allerdings in der Regel kaum zulässige Legieren mit 0,3 % Chrom. Bei höherer Temperatur reichen allerdings auch diese Maßnahmen nicht mehr aus.

Wird für längere Zeit Volumenbeständigkeit gefordert, kann für Einsatztemperaturen oberhalb 400 bis 450 °C nur ferritisches Gusseisen mit Kugelgraphit eingesetzt werden. Bei durch Temperaturwechsel beanspruchten Bauteilen kann es zu Maßänderungen kommen, deren Ursache nicht innere Oxidation oder Gefügeänderungen sind, sondern alternierende, über der Warmfließgrenze liegende Zug- und Druckspannungen.

8.2.3 Warmfestigkeit

Im Gegensatz zu Gusseisen mit Lamellengraphit, dessen Festigkeit sich bis zu etwa 300°C kaum ändert, führt eine Temperaturerhöhung bei Gusseisen mit Kugelgraphit sofort zu einem Abfall der Festigkeit. Dies gilt vor allem für die perlitischen Sorten, wie aus **Bild 135** hervorgeht. Warmzugfestigkeit und Warmdehnungsgrenze sind innerhalb der Streubänder abhängig von der chemischen Zusammensetzung. Sie nehmen mit höheren Mangan-, Phosphor- und Siliciumgehalten sowie durch Zusatz von Molybdän oder Nickel zu. Die Wirkung von Silicium wird im **Bild 135** durch die eingetragenen Werte für hitzebeständiges ferritisches Gusseisen mit 4 % Silicium verdeutlicht. Aus dem Bild ist zudem ersichtlich, dass die Bruchdehnung ein Minimum zwischen 200 und 400 °C hat. Die Härte fällt bis etwa 350 °C allmählich und darüber steil ab.

Die Kerbschlagarbeit von ferritischem Gusseisen mit Kugelgraphit nimmt mit steigender Temperatur langsam ab, sinkt aber bis 600 °C nicht unter den Wert der Tieflage. Bei perlitischem Gefüge erfolgt zunächst eine Zunahme bis in die Hochlage, die unter Umständen erst bei 200 bis 300 °C erreicht wird, und dann erst eine Abnahme.

Der Elastizitätsmodul von Gusseisen mit Kugelgraphit wird mit steigenden Temperaturen zunächst wenig und dann stärker vermindert. Bei perlitischen Sorten nimmt er von ~ 175 bei RT auf ~150 kN/mm² bei 550 °C ab, bei ferritischen Sorten von ~160 bei RT auf ~135 kN/mm² bei 450 °C [118]. Es ist zu berücksichtigen, dass der im Zugversuch bestimmte und üblicherweise als E-Modul angegebene statische Wert niedriger ist als der mit Schwingungs-

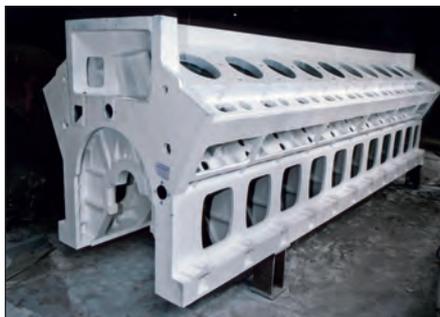


Bild 136: Gewichtsoptimiertes Diesel-Gas-Motorengehäuse mit 20 Zylindern sowie eingossener Ölversorgung und Wasserkühlung, Werkstoff EN-GJS-400-18, Gewicht 27 t (Bild: SHW, Aalen-Wasseraffingen)

messungen bestimmte dynamische E-Modul. Weiterhin ist zu beachten, dass eine Spannungs- beziehungsweise Dehnungsabhängigkeit beider E-Module besteht, die ebenfalls einem Temperatureinfluss unterliegen [119].

8.2.4 Zeitstandeigenschaften

Für die Bemessung von Druckbehältern und Armaturen aus Gusseisen mit Kugelgraphit gilt das **AD-2000 Merkblatt W 3/2** mit den in **Tabelle 10** genannten Werten für die 0,2-%-Dehngrenze und Betriebstemperaturen bis 350 °C. Die Streubänder der 1000-h-Zeitstandfestigkeit von unlegiertem Gusseisen mit Kugelgraphit sind in Abhängigkeit von der Temperatur im **Bild 137a** dargestellt. Die anfänglich höhere Festigkeit der perlitischen Sorten nimmt mit steigender Temperatur ab und nähert sich der der ferritischen Sorten. Bei längeren Beanspruchungszeiten über 450 °C ist zudem mit zumindest teilweisem Zerfall des Perlits zu rechnen, wodurch die Festigkeit verringert wird. Angaben über das Kriechverhalten von unlegiertem Gusseisen mit Kugelgraphit im Temperaturbereich um 400 °C enthält **Bild 137b**. Wie aus

den **Bildern 137c** und **137d** ersichtlich, lassen sich die Zeitstandeigenschaften durch Zusatz von Legierungselementen verbessern. In erster Linie wird Molybdän, seltener Nickel verwendet.

Bei Druckbeanspruchung ist die Abhängigkeit des Kriechverhaltens von der Temperatur ähnlich wie bei Zugbeanspruchung, was im **Bild 137e** für ferritisches und perlitisches Grundgefüge bei 400 und 450 °C gezeigt wird. Für längere Beanspruchungszeiten können, um jede Maß- und Eigenschaftsänderung durch Perlitzerfall auszuschließen, nur ferritische Sorten verwendet werden.

Dem starken Oxidationsangriff bei Einsatztemperaturen über 600 °C wird mit einem Siliciumgehalt von über 4 % begegnet. Ein Legieren mit Molybdän verbessert außerdem die Zeitstandeigenschaften. Werte für die Zeitstandfestigkeit und die Kriechgeschwindigkeit solcher Werkstoffe, die häufig mit dem Kurznamen GJS-SiMo bezeichnet werden, sind für 705 °C in den **Bildern 137f** und **137g** enthalten (siehe aus Kapitel 10. 4). Die höchstmögliche Einsatztemperatur für ein Gusseisen mit etwa 4 % Silicium ist 820 °C. Bei höherer Temperatur beginnt die Ferrit-Austenit-Umwandlung, die den Werkstoff recht rasch zum Erliegen bringt.

Ein Verspröden von Gusseisen mit Kugelgraphit, wie beispielsweise die 475-°C-Versprödung bei manchen Stählen, tritt auch nach langzeitigem Halten bei 400 bis 500 °C nicht auf.

8.2.5 Temperaturwechselbeständigkeit

Häufige Temperaturwechsel stellen eine starke Beanspruchung der Bauteile dar und können diese durch Risse oder Verformungen unbrauchbar machen. Ursache sind Spannungen, die aufgrund eines

Tabelle 10: 0,2-%-Dehngrenze von GJS für die Berechnung von Druckbehältern und Sicherheitsbeiwerte (nach AD-2000-Merkblatt W3/2 von 2003)

Werkstoff EN- ...	0,2-%-Dehngrenze [N/mm ²]								Sicherheitsbeiwert S
	Wanddicke: bis 60 mm				Wanddicke: 60 bis 200 mm				
	Betriebstemperatur in °C bis								
	20 (50)	150	250	350	20 (50)	150	250	350	
GJS-350-22RT	220	200	170	140	-	-	-	-	2,4
GJS-400-18RT	250	230	200	160	230	210	180	150	2,4
GJS-400-15	250	230	200	160	230	210	180	150	3,5
GJS-500-7	320	290	250	200	260	240	200	160	4,0
GJS-600-3	380	350	310	230	320	290	260	190	5,0
GJS-700-2	440	410	370	300	360	330	300	250	5,0

behinderten thermischen Ausdehnens oder Zusammenziehens entstehen. Sie sind der Temperaturdifferenz, dem Elastizitätsmodul und dem thermischen Ausdehnungskoeffizienten des Werkstoffs proportional. Die entstehenden Zugspannungen können in manchen Fällen fast Werte wie bei der Zugfestigkeit erreichen oder diese sogar überschreiten, so dass sehr schnell Risse auftreten. Gewöhnlich bilden sich diese nach einer bestimmten Zahl von Temperaturwechseln infolge Überschreitens der Dauerwechselfestigkeit.

Gusseisen mit Kugelgraphit besitzt aufgrund seiner hohen Zugfestigkeit, Dauerwechselfestigkeit und Bruchdehnung bei Raumtemperatur eine gute Beständigkeit gegen Rissbildung. Andererseits sind aber die entstehenden Spannungen wegen des höheren Elastizitätsmoduls deutlich größer als die von Gusseisen mit Lamellengraphit.

Das Verhalten von Gusseisen mit Kugelgraphit hängt von der Art der Temperaturwechselbeanspruchung ab. Bei sehr schroffen Temperaturänderungen, die allerdings in der Praxis kaum auftreten, kann es aufgrund der niedrigeren Wärmeleitfähigkeit eher zu Brandrissen kommen als bei Gusseisen mit Lamellengraphit. Bei langsamer Abkühlgeschwindigkeit wirken sich dagegen die höhere Festigkeit und Duktilität des Gusseisens mit Kugelgraphit aus, so dass die Brandrissbeständigkeit in der Regel höher ist als die von Gusseisen mit Lamellengraphit [115, 118, 124].

Gusseisen mit Kugelgraphit hat eine starke Neigung zum Verzug. Dies ist eine Folge des hohen Elastizitätsmoduls, der bei Temperaturdifferenzen zu großen Spannungen führt. Diese können vor allem bei unlegierten, ferritischen Sorten die relativ niedrige Dehngrenze überschreiten und damit zu Verzug und Verformung des Bauteils führen.

Aufgrund seiner hohen Festigkeit hat perlitisches Gusseisen mit Kugelgraphit die höchste Beständigkeit gegen Rissbildung und Verzug, sofern der Perlit nicht als Folge der Temperaturbelastung zerfällt.

Der Perlitfall wird durch Temperaturwechselbeanspruchung und Spannungen zudem deutlich beschleunigt.

Die Temperaturwechselbeständigkeit von ferritischem Gusseisen mit Kugelgraphit kann durch Erhöhen der Warmfestigkeit, also durch Legieren mit Molybdän, deutlich verbessert werden. Es hat sogar eine höhere Temperaturwechselbeständigkeit als unlegierte perlitische Sorten, obwohl diese bei Raumtemperaturen höhere Festigkeit haben.

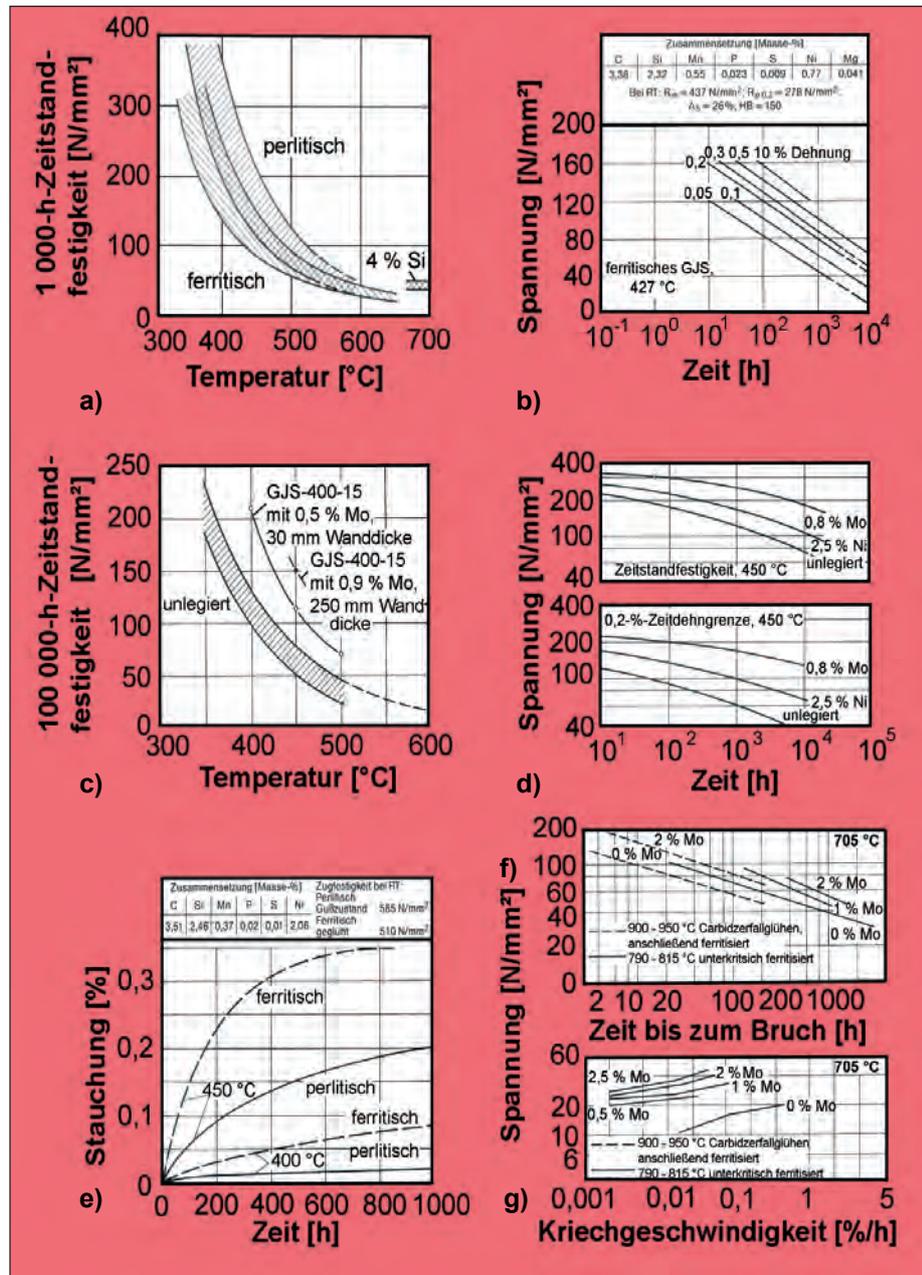


Bild 137: Zeitstandfestigkeit und Kriechverhalten von Gusseisen mit Kugelgraphit
a) Temperaturabhängigkeit der 1000-h-Zeitstandfestigkeit von GJS (nach [118, 120])
b) Kriechverhalten von ferritischem GJS bei 427 °C (nach [120])
c) Einfluss von Temperatur, Wanddicke und Molybdängehalt auf die 100 000-h-Zeitstandfestigkeit von GJS (nach [121])
d) Zeitstandfestigkeit und Zeitdehngrenze von unlegiertem und legiertem ferritischem GJS mit 3,6 % C; 2,4 % Si; 0,3 % Mn; 0,05 % P, 0,006 % S; und 0,045 % Mg (nach [122])
e) Kriechverhalten eines perlitischen und eines ferritischen GJS bei 400 und 450 °C unter 230 N/mm² Druckspannung (nach [123])
f) Typische Werte für die Zeitstandfestigkeit von GJS mit 4 % Si bei 705 °C in Abhängigkeit vom Molybdängehalt und Ferritisierungsverfahren (nach [116])
g) Typische Werte für die Kriechgeschwindigkeit von GJS mit 4 % Si bei 705 °C in Abhängigkeit vom Molybdängehalt und Ferritisierungsverfahren (nach [116])

8.2.6 Physikalische Eigenschaften

Die für Gusseisen mit Kugelgraphit zum Einsatz bei erhöhten Temperaturen wichtigsten physikalischen Eigenschaften sind die Wärmeleitfähigkeit beziehungsweise Temperaturleitfähigkeit und der thermische Ausdehnungskoeffizient.

Die Wärmeleitfähigkeit hängt in erster Linie von der Grundmasse, dem Siliciumgehalt und anderen in der Grundmasse gelösten Elementen, z.B. Nickel, und dem Graphitgehalt ab. Mit steigendem Graphitgehalt nimmt die Wärmeleitfähigkeit zu, jedoch in geringerem Maße als bei Gusseisen mit Lamellengraphit. Erhöhen des

Siliciumgehalt und auch des Nickelgehalt senken die Wärmeleitfähigkeit. **Tabelle 11** enthält Mittelwerte für die Wärmeleitfähigkeit. Bei ferritischem Gusseisen mit Kugelgraphit senkt ein von 2 auf 3 % erhöhter Siliciumgehalt die Wärmeleitfähigkeit von 39 auf rund 37,5 W/(m · K).

Der thermische Ausdehnungskoeffizient von Gusseisen mit Kugelgraphit hängt nur wenig vom Grundgefüge und der chemischen Zusammensetzung ab, sofern es sich nicht um austenitisch-ferritisches oder austenitisches Gefüge handelt. In der **Tabelle 12** sind mittlere Werte in Abhängigkeit von der Temperatur angegeben. Perlitische Gefüge hat aufgrund des geringeren thermischen Ausdehnungskoeffizienten des Zementits etwas niedrigere Werte als ferritisches Gefüge. Mit steigender Temperatur nimmt der thermische Ausdehnungskoeffizient zu.

Sprunghaft ändert sich der thermische Ausdehnungskoeffizient, wenn es zu einer Gefügeumwandlung kommt, sei es zum Zerfall von Perlit zu Ferrit und Graphit, was eine erhebliche Ausdehnung verursacht, sei es, dass die Ferrit-Austenit-Umwandlung durchlaufen wird, da es hier ebenfalls zu einem Volumensprung kommt und zudem Austenit einen größeren Ausdehnungskoeffizienten als Ferrit hat.

8.3 Eigenschaften bei niedrigen Temperaturen

Die steigende Verwendung von Gusseisen mit Kugelgraphit im Fahrzeugbau, bei Windenergieanlagen und für Armaturen führt in zunehmendem Maße zum Einsatz bei niedrigen Temperaturen. Dabei findet der Bereich der arktischen Temperaturen (um -40 bis -60 °C) besonderes Interesse. Dieser Temperaturbereich lässt sich natürlich mit austenitischen Werkstoffen sehr gut beherrschen. Im Zeichen steigender Energie- und Rohstoffkosten drängt sich zwangsläufig die Frage auf, ob es für diesen an übliche Einsatztemperaturen grenzenden Bereich nicht möglich ist, auch unlegierte Werkstoffe zu verwenden, zumal bis zu -40 °C für EN-GJS-350-22-LT und -20 °C für EN-GJS-400-18-LT nach DIN EN1564 ohnehin Garantien (über das Kerbschlagverhalten) abgegeben werden müssen.

8.3.1 Kerbschlagverhalten

Das Kerbschlagverhalten ist jedoch nicht allein entscheidend. Einmal lässt sich Schlagzähigkeit durch Wanddicke ersetzen [125], zum zweiten erfolgt die Grundbelastung meist nicht schlagartig, und schließlich vermeidet man im allgemeinen bei jeder Konstruktion scharfe äußere Kerben. Damit aber wird die Über-

Tabelle 11: Anhaltswerte für die Wärmeleitfähigkeit von GJS bei Temperaturen bis 500 °C (nach [116, 121])

Werkstoff EN- ...	Wärmeleitfähigkeit [W/(m.K)] bei				
	100°C	200°C	300°C	400°C	500°C
GJS-350-22RT	40,2	43,3	41,5	38,8	36,0
GJS-400-15	38,5	41,5	39,8	37,4	35,0
GJS-500-7	36,0	38,8	37,4	35,3	33,5
GJS-600-3	32,9	35,4	34,2	32,8	31,6
GJS-700-2	29,8	32,0	31,0	30,3	29,8
4SiMo	25,1	27,2	28,1	28,6	28,9

Tabelle 12: Mittlerer thermischer Ausdehnungskoeffizient von ferritischem und perlitischem GJS im Temperaturbereich von 20 bis 500 °C [nach [116, 121])

Werkstoff EN- ...	Linearer Ausdehnungskoeffizient [$10^{-6}/K$] zwischen 20 und				
	100°C	200°C	300°C	400°C	500°C
GJS-400-15 (ferritisch)	11,2	11,9	12,5	13,0	13,4
GJS-700-2 (perlitisch)	11,1	11,7	12,3	12,8	13,2
4SiMo (ferritisch)	10,7	12,7	13,4		

gangstemperatur zwischen duktilem und sprödem Verhalten zum Teil deutlich zu niedrigeren Temperaturen verschoben.

Weiterhin ist die Schlagzähigkeit beziehungsweise die Schlagarbeit ohnehin keine Kennzahl, mit der konstruiert werden kann, sondern letztlich ein Anhalt dafür, dass beim Überschreiten der Belastbarkeit Energie durch plastische Formänderung unschädlich gemacht und nicht in kinetische Energie (= umherfliegende Bruchstücke) verwandelt wird. Gerechnet werden kann und muss vielmehr mit Festigkeitskennwerten und insbesondere - häufig stellvertretend für andere - mit Streckgrenze oder Dehngrenze. Im Übrigen ist die Schlagzähigkeit bei weitem nicht der einzige Maßstab für die

Duktilität eines Werkstoffes. Bei geringer Belastungsgeschwindigkeit sind vielmehr Bruchdehnung und Brucheinschnürung genauso interessant und für das Werkstoffverhalten sogar aussagefähiger. So ist es denn auch unter Berücksichtigung der Erkenntnisse der Bruchmechanik nach wie vor interessant zu wissen, wie die Ergebnisse von Zugversuchen bei niedrigen Temperaturen aussehen.

Am besten wäre es natürlich, wenn für gemäßigte Zonen geeignete Geräte und Werkzeuge ohne Änderung auch in klimatisch ungünstigen Gebieten einsetzbar wären. Das ist zweifellos um so eher möglich, je spröder sich der Werkstoff bei Raumtemperatur verhält. Denn wenn ein Werkstoff bei Raumtemperatur vollständig spröde ist, wird seine Schlagempfindlichkeit auch bei -50 °C nicht größer werden.

8.3.2 Festigkeitseigenschaften

Nach [126, 127] nimmt die Elastizitätsgrenze R_p bei allen Sorten mit sinkender Temperatur linear und mit gleichem Steigungsmaß zu. Die Kurven für die 0,2-%-Dehngrenze von EN-GLS-400-15 und EN-GJS-500-7 steigen mit sinkender Temperatur überproportional und parallel zueinander an, die von EN-GJS-600-3 und GJS-700-2 mit bei Raumtemperatur gleicher Ausgangssteigung linear und ebenfalls parallel.

Wie aus **Bild 139a** zu entnehmen, wird offensichtlich die Temperaturabhängigkeit der Zugfestigkeit durch den Perlitgehalt „gedreht“, und zwar um einen Punkt, der



Bild 138: Pressenkopf für eine mechanische Stanzpresse aus EN-GJS-500-7U, Abmessungen 5577 x 2660 x 1925 mm, Rohgussgewicht 31 300 kg (Das sehr große Gussteil wurde im Vollformgießverfahren mit einem aufgeschäumten Polystyrolmodell wirtschaftlich in einem Teil gegossen). (Bild: Röhheld & Moelle, Mainz)

bei etwa $-125\text{ }^{\circ}\text{C}$ und etwa 500 N/mm^2 liegt. Mit steigendem Perlit (also geringer werdendem Ferrit-)Gehalt geht mit sinkender Temperatur der Anstieg der Kurven in einen Abfall über. Der Perlitgehalt, bei dem die Festigkeit von der Temperatur in dem hier untersuchten Bereich völlig unabhängig ist, dürfte bei über 50 % liegen, wenn davon ausgegangen wird, dass EN-GJS-500-15 mit noch relativ hoher Dehnung üblicherweise auch einen recht hohen Ferritgehalt hat.

Der Elastizitätsmodul zeigt einen ähnlichen Verlauf wie die Elastizitäts- und 0,2%-Dehngrenze, wie am Beispiel von EN-GJS-500-15 im **Bild 139b** zu erkennen ist. Er nimmt mit sinkender Temperatur leicht zu. Interessant ist, dass bei hohen Temperaturen stärkere Abweichungen nach unten, bei niedrigeren Temperaturen stärkere Abweichungen nach oben auftreten. Dem Verlauf der Hüllkurve zufolge ist also eine steilere Temperaturabhängigkeit zu erwarten.

Nach Untersuchungen an ferritischem Gusseisen mit Kugelgraphit [128, 129] zeigt sich ein überproportionaler Anstieg der 0,2%-Dehn- und Stauchgrenzen mit sinkender Temperatur, wobei das Verhältnis Stauch- zu Dehngrenze über den gesamten Temperaturbereich mit etwa 1,05 konstant bleibt. Auch die Zugfestigkeit steigt nach diesen Untersuchungen unterhalb Raumtemperatur überproportional an, wobei das Dehngrenzenverhältnis sich mit sinkender Temperatur dem Wert 1 nähert. Da bei duktilen Werkstoffen eine Druckfestigkeit nicht zu bestimmen ist, wurde die 8%-Stauchgrenze ermittelt, die ebenfalls mit sinkender Temperatur ansteigt, aber auch bei $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ noch deutlich über der 0,2%-Stauchgrenze bleibt.

Die Temperaturabhängigkeit der mechanischen Eigenschaften von austenitisch-ferritischem Gusseisen mit Kugelgraphit lässt sich ohne weiteres in den gezeigten Rahmen der ferritischen bis perlitischen Sorten einordnen [130].

8.3.3 Zähigkeitseigenschaften

Bruchdehnung und Brucheinschnürung (**Bild 139c**) sowie an verformten Proben gemessene Schlagarbeit (**Bild 139d**) verhalten sich sehr ähnlich. Von EN-GJS-400-15 zu EN-GJS-500-7 nimmt die Hochlage von Bruchdehnung und Schlagarbeit stark ab, von EN-GJS-500-7 zu EN-GJS-600-3 weniger stark und von EN-GJS-600-3 zu EN-GJS-700-2 kaum noch. Die Übergangstemperaturen steigen mit zunehmender Festigkeit. Bei der GJS-400-15-Kurve ist der Abfall im Bereich der Übergangstemperatur etwas steiler. Allerdings ist bei der Bruchdehnung der Abstand von Hoch- und reiner Tieflage mit etwa 75 K immer noch recht groß.

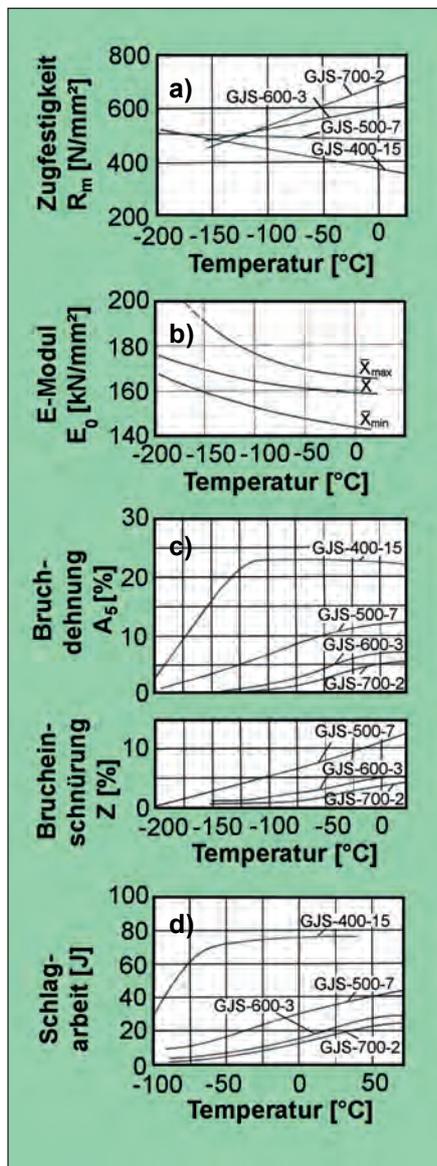


Bild 139: Eigenschaftsverlauf von GJS bei tiefen Temperaturen (nach [126, 127])

- a) extrapolierter Festigkeitsverlauf von GJS bei abnehmenden Temperaturen
- b) E-Modul von EN-GJS-500-7 bei abnehmender Temperatur
- c) Hochlage und Übergangstemperatur von Bruchdehnung und Brucheinschnürung für einige GJS-Sorten
- d) Verlauf der Schlagarbeit in Abhängigkeit von der Temperatur bei einigen GJS-Legierungen

8.3.4 Spezielle Anforderungen an Windenergieanlagengussteile

Erst in den 1990er Jahren, 20 Jahre nach der ersten Ölkrise wurde die Windkraft als ernst zu nehmende Alternative für die Energieversorgung definiert und bis 2002 wurden in Europa für 32 000 MW Windkraftwerke installiert. Die damals für 2007 prognostizierte Zahl einer jährlichen Steigerung um rd. 15 bis 17 % bis auf 58 000 bis 60 000 MW in Europa allein bewahr-

heitet sich. Nach oben tendiert auch die Größe der einzelnen Anlagen. Die Zwerge von 1980 mit 0,03 MW, einer Höhe von 30 m und einem Rotordurchmesser von 15 m sind bis auf 5 MW und 130 beziehungsweise 115 m angewachsen (**Bild 140**) Wichtige Bauteile im Gondel- und Getriebebereich sind Gussteile aus Gusseisen mit Kugelgraphit (**Bild 141**).

Die andalusische Westküste dürfte an die Gussstücke ihrer Aberhunderte von Windkraftwerken, die mehr durch ihre Konzentration als ihre Größe beeindruckend, weniger abverlangen als das raue Klima an und in der Nordsee oder in arktischen Gebieten. So bestehen in dortigen Anlagen die Gussteile grundsätzlich aus dem für tiefe Temperaturen geeignetem Werkstoff EN-GJS-400-18-LT, ob es sich dabei um das Abstützrohr für die Gondel, eine Rotornabe mit Adapter zum Rotorblatt oder ein anderes Gussteil handelt. Die herausragende Eigenschaft dieses Werkstoffs ist die ISO-V-Kerbschlagarbeit bei $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, die mit $>12\text{ J}$ zu gewährleisten ist (**Tabelle 13**). Die chemische Zusammensetzung mit 3,3 bis 3,5 % C, 1,9 bis 2,2 % Si, $<0,15\%$ Mn, $<0,030\%$ P, 0,008 bis 0,012 % S und 0,04 % Mg (Empfehlung) spiegelt diese Forderung sowohl qualitativ als auch quantitativ deutlich wieder.

Weitere Carbide stabilisierende Elemente oder solche, die um die Graphiteinschlüsse Diffusionsbarrieren bilden können, müssen auf Spurenniveau gehalten werden. Alles, was versprödet, wie etwa das Phosphideutektikum, wird restriktiv behandelt (**Bild 143a**). Selbst Silicium ist davon betroffen (**Bild 143b**), das im Hinblick auf das gewünschte hohe Graphitisierungspotential zwar so hoch wie nötig, wegen der Versprödung des Ferrits aber so niedrig wie möglich einzustellen ist.



Bild 140: Prototyp der 5MW-Windenergieanlage REpower 5M in Brunsbüttel (Bild: REpower, Hamburg)

Das Gefüge der Gussteile muss folgende Merkmale aufweisen:

- Anzahl Graphitkugeln von 100 bis 200 Kugeln/mm² (Höhere Kugelzahlen gefährden den A_{ISO-V}-Wert, niedrigere steigern die Gefahr des Ausscheidens spröder interzellularer Phasen!);
- eine Nodularität von min. 95 %;
- eine regelmäßige Kugelform (Unregelmäßig ausgebildete Graphitkugeln können Riss auslösend wirken!);
- eine vollferritische Matrix; (Perlit oder andere an den Zellen- oder Kolonienrändern geseigerte Carbide oder nicht-metallische Einschlüsse sind nicht zulässig!) (Bild 143c)
- keinerlei Mikroporen und/oder Dross im Gussteil.

Aus diesen Forderungen ergeben sich die bei der Gussherstellung einzustellenden Parameter ganz von allein:

- Reine Einsatzstoffe (etwa 40 % Spezialroheisen, artreines Kreislaufmaterial, hochreiner Stahlschrott);
- Behandlung mit Magnesium unter Vermeidung von Mg-Restgehalten über 0,045 % und Verwendung von Vorlegierungen mit möglichst niedrigen Gehalten an Magnesium und Silicium;
- Kontrollierte, gegebenenfalls in zwei Stufen durchzuführende Impfung; (Die in der chemischen Zusammensetzung vorgesehene untere Grenze für den Schwefelgehalt berücksichtigt die Anwendung von Impfmitteln, die unter Bildung von Sulfiden keimwirksam werden. Die Keimbildung sollte in mehreren aufeinander folgenden Wellen erfolgen.);
- Die Gießtemperatur, üblicherweise zwischen 1370 und 1400 °C angesiedelt, ist stückabhängig unter Berücksichtigung der verwendeten Speisetechnik zu bestimmen (So weit wie möglich soll das Eisen unter Nutzung des eigenen Speisungsvermögens erstarrten. Die Expansion des eutektischen Graphits soll zu diesem Zweck in mehreren Erstarrungswellen geschehen. Ergebnis eines solchen Er-

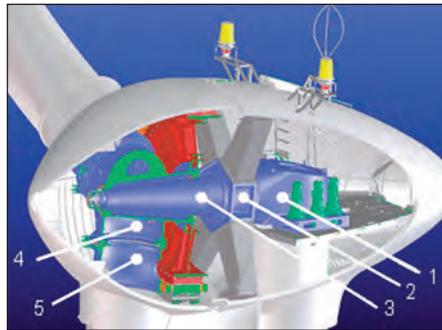


Bild 141: Schnitt durch eine Windanlagengondel mit den typischen Gussteilen aus EN-GJS-400-18-LT

- 1 - Maschinenträger; 2 - Stratorstern, 3 - Achszapfen, 4 - Rotornabe, 5 - Blattadapter

starrungsablaufs ist unter anderem eine aus mindesten zwei voneinander signifikant verschiedenen Kollektiven bestehende Größen-Mischverteilung der Graphitkugeln [134];

- Die Formen und Kerne müssen fest, das heißt gut verdichtet sein, damit sie dem Kristallisationsdruck des Graphits widerstehen und dadurch die Ei-



Bild 142: Planetensteg für Windenergieanlagen und andere Großgetriebe aus EN-GJS-700-2 und ADI-Gusseisen als Ersatz für Stahlguss (Bild: Silbitz Guss)

genspeisung unterstützen können (Im übrigen gilt für die gewünschte schnelle Formfüllung die Regel: Lieber eine Luftpeife zu viel als eine zu wenig setzen!).

Trotz all dieser Forderungen und restriktiver Randbedingungen ist heute gängige Praxis, Gussteile sämtlicher Größenordnungen aus EN-GJS-400-18-LT im Gusszustand, das heißt ohne kostspielige ferritisierende Wärmebehandlung herzustellen.

Tabelle 13: Mechanische Eigenschaften (gewährleistete Mindest- und Anhaltswerte) von EN-GJS-400-18LT (nach [131])

Eigenschaft	Maßgebende Wanddicke T [mm]	Gemessen an	
		getrennt gegossenen Probestücken	ange-gossenen Probestücken
Zugfestigkeit R _m [N/mm ²]	≤ 30 30 bis 60 60 bis 200	≥ 400	≥ 400 ≥ 390 ≥ 370
0,2%-Dehngrenze R _{p0,2} [N/mm ²]	≤ 30 30 bis 60 60 bis 200	≥ 240	≥ 240 ≥ 230 ≥ 220
Bruchdehnung A [%]	≤ 30 30 bis 60 60 bis 200	≥ 18	≥ 18 ≥ 15 ≥ 12
ISO-V-Kerbschlagarbeit A _{ISO-V} Mittelwert bei -20 °C [J]	30 bis 60 60 bis 200	≥ 12	≥ 12 10
Härte HB 30		120 bis 160	
Elastizitätsmodul E [kN/mm ²]		160 bis 180	
Schubmodul [kN/mm ²]		~ 0,4 · E	
Druckfestigkeit σ _{dB} [N/mm ²]		700	
Biegewechselfestigkeit σ _{bW} [N/mm ²]		+/- 200	
Zug-Druck-Wechselfestigkeit σ _{zδW} [N/mm ²]		+/- 110	
Bruchzähigkeit K _{IC} [N/mm ² ·√m]		30	

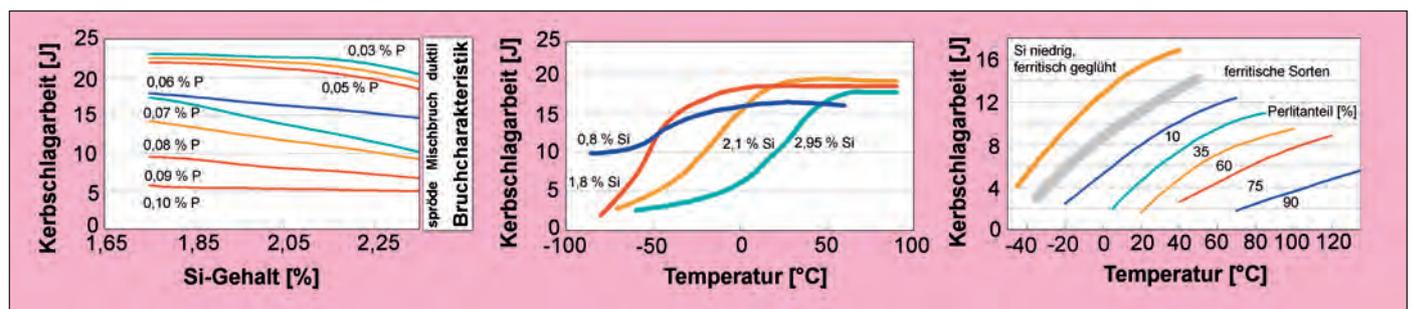


Bild 143: Einfluss der Legierungszusammensetzung auf die Eigenschaften von GJS-Teilen
a) Mit steigenden Gehalten an Phosphor und Silicium sinkt die Kerbschlagarbeit bei ferritischem GJS (nach [132])
b) Mit sinkendem Siliciumgehalt sinkt die Übergangstemperatur von zähem zu sprödem Bruch (nach [133])
c) Nur ein voll ferritisches Gefüge eines niedrig silicierten GJS kann den Ansprüchen auf hohe Kerbschlagarbeit bei niedrigen Temperaturen gerecht werden (nach [133])

8.4 Verschleißverhalten

Unter Verschleiß versteht man einen auf mechanischen Ursachen beruhenden fortschreitenden Materialverlust auf der Oberfläche eines festen Körpers. Eine Verschleißbeständigkeit als Werkstoffkenngröße gibt es nicht, sondern das Verschleißverhalten hängt vom Tribosystem (Grundkörper, Gegenkörper oder -stoff und Randbedingungen wie Umgebungsmedium, Bewegungsrichtung oder Anpressdruck) ab. Die für Gusseisen wichtigsten Verschleißmechanismen sind Abrasion, die mit mineralischen Gegenkörpern vor allem im Bereich der Steine- und Erden-Industrien auftritt, und Adhäsion und Oberflächenzerrüttung mit metallischen Gegenstoffen.

8.4.1 Abrasivverschleiß

Die Abrasiv-Beständigkeit von Eisenwerkstoffen hängt vom in der Grundmasse gelösten oder als Carbid ausgeschiedenen Kohlenstoffgehalt und der Ausbildung der Grundmasse ab [135, 136]. Die Härte im Anlieferungszustand ist kein zuverlässiges Maß für die Verschleißbeständigkeit, aber als Indikator für das Grundgefüge eines bestimmten Werkstoffes brauchbar.

Im **Bild 144** [137] sind beispielhaft die Streufelder der im Schleifstopfversuch bestimmten Verschleißbeständigkeiten verschiedener Eisenwerkstoffe über der Härte dargestellt. Gusseisen mit Kugelgraphit EN-GJS-600-3 bis EN-GJS-800-2 liegen in der Mitte des Streufeldes unlegierter und niedrig legierter Stähle gleicher Härte. EN-GJS-700-2 verhält sich etwa wie ein normalisierter unlegierter Stahl mit 0,5 % C. EN-GJS-500-7 und EN-GJS-400-15 sind aufgrund ihres an Kohlenstoff ärmeren weitgehend ferritischen Grundgefüges weniger verschleißbeständig, so dass zum Beispiel EN-GJS-400-15 zwischen GE240 und GE260 liegt.

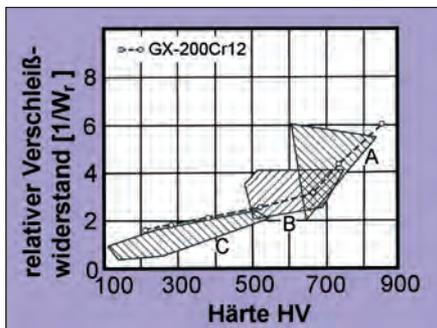


Bild 144: Verschleißbeständigkeit verschiedener Eisenwerkstoffe bei Abrasivverschleiß, gemessen im Schleifstopfverfahren mit Quarzsand (nach [137])

- A - martensitisches weißes Gusseisen, Ni-Cr-legiert
- B - perlitisches weißes Gusseisen, un- und niedrig legiert
- C - Stähle mit 0,15 bis 0,5 % C, graues Gusseisen mit Kugelgraphit



Bild 145: Höherfeste Gussteile für starke Beanspruchungen aus legierten Gusseisensorten (Bild: Eickhoff, Bochum)

Die völlig oder überwiegend ferritischen Sorten sind daher für Bauteile, die abrasivem Verschleiß unterliegen, nicht gut geeignet. Werden diese Werkstoffe aus anderen Gründen, zum Beispiel wegen ihrer höheren Zähigkeit oder besseren Bearbeitbarkeit, eingesetzt, können sie mit einer verschleißbeständigen Beschichtung versehen werden. So hat sich zum Beispiel bei REA-Pumpen eine Beschichtung aus polymergebundenen SiC gut bewährt [1438]. Die perlitischen Sorten sind verschleißbeständiger und zwar umso mehr, je dichter und feinstreifiger der Perlit ist, so dass in der Regel die Verschleißbeständigkeit von EN-GJS-700-2 bis EN-GJS-900-2 beziehungsweise EN-GJS-HB265 bis EN-GJS-HB330 zunimmt.

Austenitisch-ferritische, bainitisch-austenitische oder martensitische Gusseisen mit Kugelgraphit (siehe Kapitel 10) haben einen Verschleißwiderstand, der vielen niedriglegierten Vergütungsstählen wie zum Beispiel 42CrMo4 [139] überlegen ist, und können sogar die Werte von Manganhartstahl oder verschleißbeständigem martensitischem Gusseisen EN-GJN-HV520 (Ni-Hard 2) nach **DIN EN 12513** erreichen oder sogar übertreffen [136]. Insbesondere austenitisch-ferritisches Gusseisen mit Kugelgraphit (ADI) nach **DIN EN 1564** zeichnet sich durch eine günstige Kombination von Verschleißbeständigkeit und Zähigkeit aus. Das Grundgefüge dieser Sorten wird in der Regel durch eine Wärmebehandlung erzeugt, kann aber, wenn die Vergütung wegen der Größe und Form der Gussstücke zu schwierig erscheint, auch im Gusszustand (zum Beispiel GX300NiMo3Mg nach **DIN 1695**) erreicht werden.

Besonders hohe Verschleißbeständigkeit haben Verbundgussstücke aus perlitischem oder austenitisch-ferritischem Gusseisen mit Kugelgraphit mit einer Randschicht aus eingegossenem Hartmetall in Form von Granulat oder Platten.

8.4.2 Metall-Metall-Verschleiß

Die Verschleißmechanismen bei metallischen Werkstoffpaarungen sind Adhäsion (örtliches Verschweißen und im Extremfall Fressen) bei Gleitbewegung, Oberflächenzerrüttung bei Roll- und Wälzbewegung und bei Anwesenheit von Verschleißstaub oder Verschmutzung auch Abrasion. Durch Schmieren und geeignete Werkstoffpaarung soll vor allem die Adhäsion ausgeschaltet oder wenigstens gering gehalten werden.

Oft ist der Schmiermittelfilm beim Anfahren fast nicht vorhanden oder kann im Betrieb bei hohen Flächenpressungen örtlich zerstört werden. In diesen Fällen wirken die Graphitausscheidungen von Gusseisen als Schmiermittelreservoir. Der bei Ausfall der Schmierung herausgerissene Graphit kann selbst als Schmierstoff wirken und den zum Verschweißen führenden metallischen Kontakt verhindern oder verzögern. In Vergleichsuntersuchungen an Gusseisen, Stahl und Kupfer ließ sich diese Wirkung des Graphits eindeutig nachweisen. Während bei Stahl oder Kupfer bereits Fressen auftrat, wurde die Oberfläche von Gusseisen nur durch plastisches Fließen unter dem Einfluss der Reibungswärme geschädigt [139].

Lamellen- und Kugelgraphit üben die gleiche Wirkung aus, aber die höhere Festigkeit des Gusseisens mit Kugelgraphit setzt die Oberflächenzerstörung herab, wobei vor allem perlitische und auch ferritisch-perlitische Sorten den höchsten Widerstand gegen Gleitverschleiß und Fressen sowohl bei trockener Reibung [140] als auch beim Zusammenbruch des Schmierfilms [141] haben. Während bei der in der Praxis kaum auftretenden reinen Rollbeanspruchung EN-GJS-400-18 und EN-GJS-700-2 gleich beständig sind [140], nimmt bei Gleit-Roll-Verschleiß die Beständigkeit mit steigender Festigkeit zu. Sie ist bei austenitisch-ferritischen Guss-

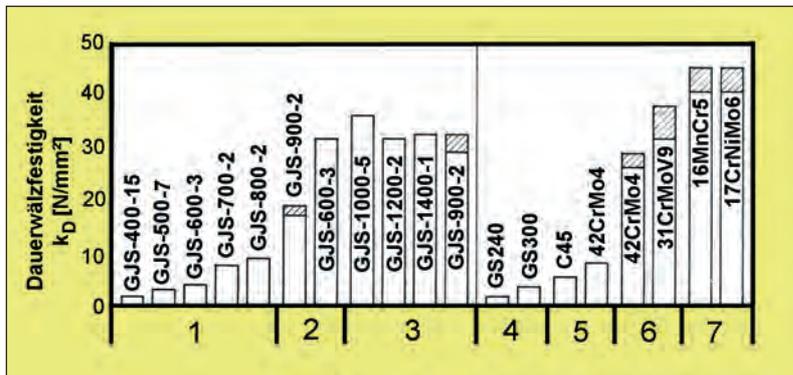


Bild 146: Dauerwältzfestigkeit von Zahnrädern aus verschiedenen Gusseisensorten und Stählen (nach [144, 145])

Bild 147: Zahnkranzhälfte aus EN-GJS-700-2, Gewicht 19,6 t, Abmessungen 7130 x 800, (Bild: ZGV, Düsseldorf)

- 1 - Gusseisensorten nach DIN EN 1564, Normalzustand
- 2 - Gusseisensorten nach DIN EN 1564, vergütet (links) und induktiv gehärtet (rechts)
- 3 - ADI-Gusseisen
- 4 - Stahlguss nach DIN EN 10293
- 5 - Schmiedestahl, vergütet
- 6 - Schmiedestahl, gasnitriert
- 7 - Stahl, einsatzgehärtet

eisen mit Kugelgraphit (ADI) am höchsten [142, 143], da es hier zusätzlich infolge des Austenitgehalts zu einer starken Kaltverfestigung der Oberfläche kommen kann.

Im Bild 146 ist die für Zahnradwerkstoffe wichtige Dauerwältzfestigkeit verschiedener Sorten von Gusseisen mit Kugelgraphit im Vergleich zu anderen Gusseisenwerkstoffen und Zahnradstählen dargestellt. Beim Überschreiten der Dauerwältzfestigkeit tritt Grübchenbildung auf. Die Beständigkeit dagegen nimmt mit steigender Festigkeit des Gusseisens mit Kugelgraphit zu. EN-GJS-700-2 und EN-GJS-800-2 übertreffen die legierten Zahnradstähle (zum Beispiel 42CrMo4 und 50CrMo4). Austenitisch-ferritische Gefüge erreichen die Werte von gasnitrierten Stählen.

Im Gebiet oberhalb der Wältzfestigkeit bleiben die aufgetretenen Grübchenschäden im Gegensatz zu Stahlzahnradern verhältnismäßig klein, so dass kurzzeitige Überschreitungen der angegebenen Dauerwältzfestigkeit zu keinen größeren Flankenaustritten führen. Das bedeutet auch, dass die Schadenslinie sehr nahe bei der Wöhlerlinie liegt und eine relativ hohe Überlastbarkeit möglich ist. Von besonderem Vorteil für die Dauerwältzfestigkeit ist die im Verhältnis zu vergütetem Stahl geringe Kerbempfindlichkeit der Oberflächen und das bessere Einlaufverhalten der Zahnflanken. Daraus ergibt sich für gefräste Zahnflanken aus Gusseisen mit Kugelgraphit eine relativ hohe Dauerwältzfestigkeit, während bei Stahlzahnradern die größere Rauheit des Abwältzfräsens zu einer beachtlichen Verringerung der Dauerwältzfestigkeit im Vergleich zur geschliffenen Oberfläche führt [146].

8.5 Korrosionsbeständigkeit

Unter Korrosion versteht man die Zerstörung des Werkstoffs durch chemische oder elektrochemische Reaktion mit seiner Umgebung. Die Basis der Korrosion von Eisenwerkstoffen ist die Umwandlung des Eisens in Eisen-Ionen und Elektronen, wobei die Elektronen durch einen Elektronenakzeptor gebunden werden müssen. Ist dies nicht gegeben, was nur bei trockener sauberer Luft und destilliertem Wasser der Fall ist, kommt die Korrosion zum Stillstand [147].

8.5.1 Korrosionsverhalten von Gusseisen

Eine wichtige Rolle für den Korrosionsverlauf spielt der Aufbau von Deckschichten. Bei der Passivierung, wie sie von Edelmetallen bekannt ist, tritt keine Korrosion auf. Bei Gusseisen ist unter fast allen Bedingungen keine Passivierung möglich, sondern es bildet sich nur eine Deckschicht, die aber das darunter liegende Metall nicht sicher zu schützen vermag, da sie nicht dicht und fest haftend genug ist. Alle Faktoren, die die Haftung und Haltbarkeit der Deckschicht ändern, beeinflussen auch die Korrosionsbeständigkeit von Gusseisen mit Kugelgraphit. Die Tabelle 14 enthält Anhaltswerte für die Korrosionsgeschwindigkeit von un- und niedrig legierten Gusseisen in verschiedenen Medien.

Die Unterschiede zwischen Gusseisen mit Lamellen- und Kugelgraphit sind nur gering. Die Korrosionsgeschwindigkeit an Luft hängt von der Luftfeuchtigkeit und der Reinheit ab. Ab einer relativen Feuchte von 70 % ist ein Korrosionsangriff möglich, der durch Schwefeldioxid und andere Verunreinigungen, die zu einer leichten Säurebildung führen, beschleunigt wird. Auch Chloride wie in Seeluft beschleunigen die Korrosion.

Die Korrosion in Süßwasser hängt von der Bildung einer schützenden Kruste ab. Hartes Wasser ist weniger aggressiv als weiches Wasser. Mit Ionentauschern enthärtetes Wasser, dessen CO₂-Gehalt nicht verändert wurde, kann ziemlich aggressiv wirken [147 - 149]. Bei Kreisläufen von Prozesswasser können Inhibitoren den Korrosionsangriff in erheblichem Maße vermindern.

Sauberes ruhendes Seewasser ist nicht wesentlich aggressiver als Süßwasser, aber Strömung, Verunreinigungen und die Anwesenheit von Sulfat reduzierenden Bakterien können die Korrosionsraten erheblich erhöhen. Häufig kommt es hier auch zu Lochfraß [150].

Eine brauchbare Beständigkeit gegen Säuren oder saure Lösungen besteht nicht. Wässrige alkalische Lösungen greifen dagegen bei Temperaturen unter etwa 70 °C Gusseisen kaum an. Die Korrosionsrate im Boden hängt sehr stark von der Bodenbeschaffenheit ab. Gut gelüftete lockere Böden verursachen eine geringe Korrosion, während nasse Böden und anaerobische Bedingungen die Korrosion verstärken. Der Einfluss des Gefüges auf die Korrosionsbeständigkeit ist gering und schwächer als der von Variationen der oben genannten Einflussgrößen. Gussfehler wirken sich ungünstig aus.

Ein Sonderfall ist die Beständigkeit in Schwefelsäure [147]. Während die Beständigkeit in verdünnter Säure sehr gering ist, tritt bei Säurekonzentrationen über 80 %, vor allem aber über 96 %, ein Beständigkeitsbereich auf, der sich bei den hohen Konzentrationen bis zu über 300 °C erstreckt. Nach Untersuchungen an Gusseisen mit Lamellengraphit [151, 152] sind für eine hohe Beständigkeit eine gleichmäßige feinperlische Gefügebildung von Bedeutung, wobei ein niedriger Siliciumgehalt und Zusätze von Kupfer und Nickel günstig wirken.



Bild 148: Einfache Verbindungselemente, aber auch Komponenten für Automobile und Pumpenteile lassen sich durch Korrosionsschutzmaßnahmen vor Rost schützen (Bild: Metalpals Ionon)

Legierungselemente in niedrigen Gehalten ändern an den oben genannten Verhältnissen im Prinzip nichts, können aber durch Verstärkung und Verdichtung der Schutzschicht die Korrosionsraten etwas vermindern. Etwa 1 % Kupfer kann die Beständigkeit an Luft sowie in sehr schwach sauren Lösungen verbessern. Nickel in Gehalten von 2 bis 4 % kann die Beständigkeit in entmineralisiertem Wasser steigern und wirkt sich vor allem günstig bei Korrosion durch alkalische Medien aus, wobei die Beständigkeit mit steigendem Nickelgehalt zunimmt. Hier ist ein niedriger Siliciumgehalt vorteilhaft.

8.5.2 Korrosionsermüdung

Unter dem Einfluss von Korrosion können sich die mechanischen Eigenschaften von Gusseisen mit Kugelgraphit ebenso wie bei anderen Werkstoffen verschlechtern. Bereits nach 30 Tagen in leicht bewegtem, luftgesättigtem, destilliertem Wasser wurde eine Verminderung der Zugfestigkeit, der 0,2%-Dehngrenze und der Bruchdehnung von ferritischem, perlitischem und vergütetem Gusseisen mit Kugelgraphit festgestellt [153]. Der Festig-



Bild 150: Genormte Gussrohre und Formstücke aus Gusseisen mit Kugelgraphit für den Sanitärbereich kommen in Gebäuden oberflächenbehandelt und mit Rostschutz-Überzügen versehen zur Anwendung (Bild: IZEG, St. Augustin)

Tabelle 14: Anhaltswerte für die Korrosionsgeschwindigkeit von un- und niedrig legierten Gusseisen in verschiedenen Medien [148]

Medium	Bedingungen	Abtragsrate [mm/Jahr]
Luft	Inland	< 0,250
	Küstennähe	< 0,250
natürliche Wässer	weich	< 0,250
	hart	< 0,125
	Seewasser	> 0,250
verdünnte Säuren und saure Abwässer		> 0,250
konzentrierte Mineralsäuren		> 0,250
verdünnte alkalische Lösungen und Abwässer		< 0,125
konzentrierte Alkalien		< 0,250

Tabelle 15: Ergebnisse einiger Biegeversuche mit ungekerbten Proben in verschiedenen Medien [154 -156]

GJS-Sorte	Statische Eigenschaften			Biegefestigkeit [N/mm ²]					
	Zugfestigkeit R _m	0,2%-Dehngrenze R _{p0,2}	Bruchdehnung A	Luft	Medium				
					Entmineralisiert	Destilliert	Leitung	Künstliches Meerwasser	Salzwasser, 3% NaCl
	Spray	Tropfen							
		Lastspielzahl							
[N/mm ²]	[N/mm ²]	[%]	5 x 10 ⁶		10 ⁷	10 ⁷	10 ⁷	2 x 10 ⁷	
GJS-400-18	420	279	23	240	224			46	88-122 ¹
GJS, perlitisch	726	386	5	270					
GJS, ferritisch	420	278	28	208	178			46	
GJS, perlitisch-ferritisch	660	480	4,5	310		285	230	190	
GJS, ferritisch	440	290	18,5	220		215	190	150	

¹ je nach Bearbeitungszustand



Bild 149: Schieber und Schieberklappen müssen gegenüber den fließenden Medien korrosionsschutzfähig sein

keitsverlust war umso größer, je höher die Härte beziehungsweise die Festigkeit des Eisens waren. Dieser Effekt wird auf eine Wasserstoffversprödung zurückgeführt. Eine ähnliche Schädigung tritt auch bei ADI (siehe Kapitel 8.2) auf.

Unter dem Einfluss von Korrosion wird vor allem die Schwingfestigkeit herabgesetzt. Dabei lässt sich oft keine Dauerfestigkeit mehr feststellen, sondern nur eine Zeitfestigkeit, da die Festigkeit mit steigender Lastspielzahl kontinuierlich abfällt. **Tabelle 15** enthält einige Versuchsergebnisse. Die Ergebnisse sind allerdings kaum vergleichbar, da die Versuchsbedingungen, die einen sehr starken Einfluss ausüben, bei jeder Versuchsreihe unterschiedlich waren. Durch Inhibitoren lässt sich das Verhalten der Werkstoffe teilweise merklich verbessern [9].



Bild 151: Pumpenteile für die chemische Prozesstechnik aus GJS und aus austenitischem GJS kommen wegen ihrer guten Formgebung und chemischen Beständigkeit zum Einsatz, letztere bevorzugt auch für den Einsatz im Meerwasser (Bild: ZGV, Düsseldorf)

8.6 Bruchmechanische Eigenschaften

8.6.1 Grundlagen

Mit der Anwendung bruchmechanischer Kriterien für die Werkstoffauswahl beziehungsweise Bauteilsicherheitsbewertung werden die konventionellen Kriterien ergänzt und erweitert. Dadurch kann der Konstrukteur über die erstmals mögliche Einbeziehung der Werkstoffzähigkeit, definiert als Werkstoffwiderstand gegen Riss-einleitung oder Rissausbreitung, in die Bruchsicherheitsbewertung eine beanspruchungsgerechtere Werkstoffauswahl treffen, als das auf der Basis der Schlag- oder Kerbschlagarbeit möglich ist [157].

Voraussetzung ist die Ableitung quantitativer Korrelationen zwischen der Bauteilbeanspruchung, der Größe vorhandener beziehungsweise hypothetisch angenommener Risse oder rissähnlicher Spannungskonzentrationsstellen und der Bruchzähigkeit des Werkstoffs. Hierzu gibt **Bild 152** eine schematische Übersicht. Das Einbeziehen bruchmechanischer Konzepte zur beanspruchungsgerechten Gusswerkstoff- und Gussteilbewertung wird unter Beachtung von Gussfehlern oder denkbarer gießtechnischer Unregelmäßigkeiten vor allem dann erforderlich und zunehmend praktiziert, wenn Gusswerkstoffe aufgrund ihrer spezifischen Vorteile in festigkeitsbeanspruchten und potentiell bruchgefährdeten Konstruktionen zum Einsatz kommen.

Der bruchmechanische Festigkeitsnachweis für Bauteile aus Gusseisenwerkstoff

[158] ist Bestandteil der FKM-Richtlinie [27] und weiterer fachspezifischer Regelwerke [159, 160], wobei auch für diese Bauteile die Bruchsicherheitsbewertung geschweißter Konstruktionen [161] unter Beachtung bestehender Richtlinien [162] zur bruchmechanischen Bewertung zunehmend zu beachten sein wird. Die Anwendung der FKM-Richtlinie ermöglicht die gezielte Lösung folgender Aufgabenstellungen:

- In der Konstruktionsphase können angenommene Fehler bewertet werden, um Geometrie, Werkstoff und Herstellungsverfahren zu spezifizieren;
- Während der Herstellung und im Betrieb sind geeignete zerstörungsfreie Prüfverfahren zur Qualitätskontrolle auszuwählen und gegebenenfalls Inspektionsintervalle festzulegen;
- Während des Betriebes müssen Bauteile mit Fehlern hinsichtlich ihrer gegenwärtigen und zukünftigen Gebrauchseignung bewertet werden, im Schadensfall sind die Schadensursachen zu ermitteln.

Eine wesentliche Voraussetzung für die Anwendung dieses Konzeptes besteht in der Verfügbarkeit bruchmechanischer Kennwerte sowohl für die Berechnung zulässiger Rissgrößen oder Spannungen bei statischer und dynamischer Beanspruchung als auch der Restlebensdauer zyklisch beanspruchter Bauteile. Die FKM-Richtlinie beinhaltet eine Datenbank für bruchmechanische Werkstoffkennwerte, die im Ergebnis einer Literaturrecherche entwickelt wurde.

8.6.2 Statische Beanspruchung

Die **experimentelle Ermittlung** statischer Bruchzähigkeitswerte kann nach **DIN EN ISO 127837** [163], **ESIS P2-92** [164] oder **ISO 12135** [165] erfolgen. Bestimmt werden K_{Ic} -Werte nach dem Konzept der linear-elastischen Bruchmechanik (ebener Dehnungszustand EDZ) oder Kennwerte des CTOD- und J-Integral-Konzeptes bei elastisch-plastischem Werkstoffverhalten (ebener Spannungszustand ESZ). Eine Umrechnung von J in K ist über die elastischen Konstanten E und ν

$$K = \left(\frac{E \cdot J}{1 - \nu^2} \right)^{1/2} \quad (3)$$

möglich. Aus dem Verlauf der temperaturabhängigen Bruchzähigkeitskennwerte K_{Ic} (EDZ) beziehungsweise K_Q (ESZ) für ferritisches EN-GJS-400-15, gemessen an 100 bis 200 mm dicken CT-Proben, ist ableitbar, dass gültige, das heißt auf das Bauteil übertragbare bruchmechanische Kennwerte mit vertretbaren Probenabmessungen nur mit fließbruchmechanischen Konzepten bestimmt werden können (**Bild 153**). Die gefüge- und damit festigkeitsbedingte Abhängigkeit der Bruchzähigkeit K_{Ic}^J , abgeleitet aus Risswiderstandskurven des J-Integral-Konzeptes und Umrechnung in K-Werte nach Gleichung (3) geht aus **Bild 154** hervor.

Die in **Tabelle 16** aufgeführten Kennwerte des CTOD- und J-Integral-Konzeptes wurden an 20%-seitengekerbten SENB-Proben (10 x 20 x 100 mm) über die Aufnahme von Risswiderstandskurven (Compliance Methode) gemäß **ESIS P2-**

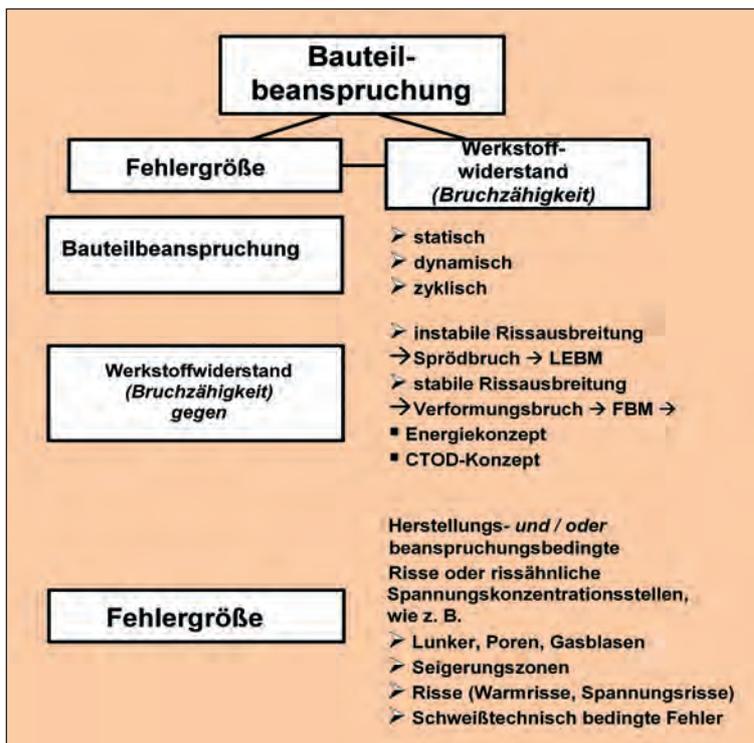


Bild 152: Prinzip des bruchmechanischen Konzeptes [158]
LEBM - linear-elastische Bruchmechanik FBM - Fließbruchmechanik

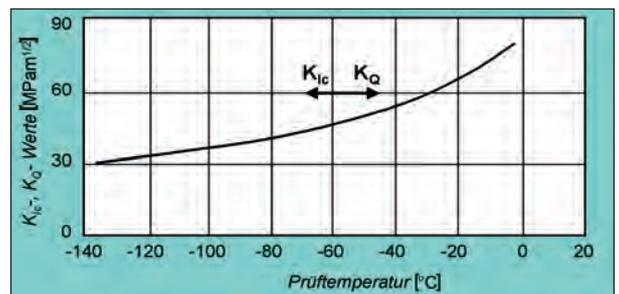


Bild 153: Verlauf der unteren Grenzkurve für die temperaturabhängigen Bruchzähigkeitswerte K_{Ic} und K_Q für ferritisches EN-GJS-400-15, gemessen an 100 bis 200 mm dicken CT-Proben [166]

Bild 154: Bruchzähigkeit K_{Ic}^J (CT-Proben, Dicke 25 mm, Teilentlastungsverfahren, ASTM E 813-81) in Abhängigkeit von der Zugfestigkeit für unterschiedliche Gusseisenwerkstoffe [167]

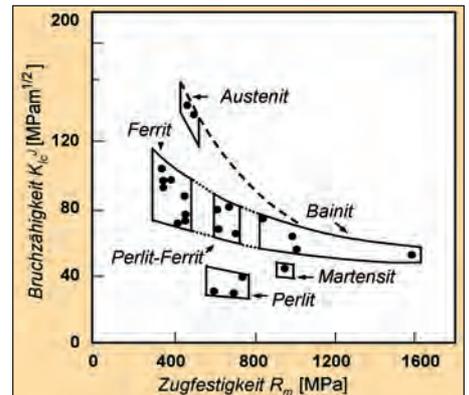


Tabelle 16: Mechanische und bruchmechanische Kennwerte
n. b. nicht bestimmt

Werkstoff EN- ...	$R_{p0,2}$ [N/mm ²]	R_m [N/mm ²]	A [%]	HB	KV [J]	SB [mm]	J_{i}^{BL} [kJ/m ²]	$J_{0,2}$ [kJ/m ²]	K_{Ic}^{Ji} [N/mm ² √m]	δ_1^{BL} [μm]	$\delta_{0,2}$ [μm]
GJS-400-15	264	413	26	143	18	0,46	21	51	60	37	92
GJS-800-10	637	893	13	292	n. b.	n. b.	11	35	45	31	27
GJS-1000-5	800	1062	8	344	7	0,03	8	20	37	6	15

92 bestimmt. Die physikalischen Rissinitiierungswerte J_i^{BL} und δ_1^{BL} werden im Schnittpunkt der Blunting-Line mit der J_R - bzw. δ_R -Kurve ermittelt. Die Umrechnung der J_i^{BL} -Werte in Werte des K-Konzeptes erfolgt nach Gleichung (3).

Die **Bauteilübertragbarkeit** bruchmechanischer Kennwerte, das heißt die Berechnung zulässiger Fehlerabmessungen, setzt die Unabhängigkeit der ermittelten Werte von Probengröße und -geometrie voraus. Vorliegende Ergebnisse zur Bauteilübertragbarkeit fließbruchmechanischer Kennwerte des J-Integral-Konzeptes bestätigen, dass physikalische Rissinitiierungswerte nach der hier erfolgten Art der Auswertung die Forderung weitestgehend erfüllen. Die auch praktizierte Bestimmung der technischen Rissinitiierungswerte $J_{0,2}$ und $\delta_{0,2}$ erfolgt über die J_R - bzw. δ_R -Kurven bei einem Betrag der stabilen Rissausbreitung von $\Delta a = 0,2$ mm. Aus den bruchmechanischen Kennwerten für unterschiedliche Gusseisenwerkstoffe gemäß **Tabelle 16**, in die auch die mechanischen Kennwerte des Zugversuchs, die Brinellhärte HB und die Kennwerte des Kerbschlagbiegeversuchs (Kerbschlagzähigkeit KV, Seitliche Breitung SB, ISO-V-Probe) aufgeführt sind, folgt, dass bei Raumtemperatur in der duktilen Matrix das Werkstoffversagen über eine stabile Rissausbreitung beginnt.

Wird die Sorte EN-GJS-600-3 mit überwiegend perlitischem Gefüge in diese Betrachtung mit einbezogen, so wird hier das Werkstoffversagen durch eine überwiegend spaltflächige stabile Rissausbreitung bis zu einem deutlichen „pop-in“-Effekt eingeleitet, dem instabile Rissausbreitung folgt. Die für EN-GJS-600-3 definierten $J_c = 15$ kJ/m² und $\delta_c = 21$ μm charakterisieren einen kritischen Rissinitiierungswert bei Auftreten des „pop-in“-Effektes, das heißt einer lokalen instabilen Rissausbreitung, der bei weiterer Belastung Werkstoffversagen durch instabile Rissausbreitung folgt.

Die FKM-Richtlinie verweist auf die Möglichkeit, bruchmechanische Kennwerte über Korrelationen zu anderen Kennwerten oder dem Gefüge abzuschätzen. Aus vorliegenden Ergebnissen folgt, dass eine Abschätzung physikalischer Rissinitiierungswerte von ferritischen Gusseisenwerkstoffen über Gefügeparameter und Kennwerte des Zugversuchs möglich ist. Für ferritisches Gusseisen mit globularer und vermicularer Graphitbildung folgt die nach **Bild 155** empirisch abgeleitete Korrelation

$$J_i = 4,6 (R_{p0,2} \cdot A \cdot \lambda) + 11,3 \text{ kJ/m}^2 \quad (4)$$

und für den Fall, dass im Ergebnis gießtechnisch bedingter größerer Abweichungen der Graphitteilchen von der Kugelform die Risseinleitungszähigkeit J_i durch die innere Kerbwirkung der Teilchen deut-

lich herabgesetzt ist, wie beispielsweise bei vermicularer Graphitbildung, die modifizierte Beziehung

$$J_i = 4,2 \cdot 10^5 \cdot \text{kJ/m}^3 (f \cdot \lambda) + 9,4 \text{ kJ/m}^2 \quad (5)$$

Hierin bedeuten λ der mit der Teilchenzahl und der Teilchengröße korrespondierende mittlere Graphitteilchenabstand und f der Formfaktor $f = 4 \pi \cdot A_T / U^2 \leq 1$, wobei A_T den Flächeninhalt und U den Umfang der Schnittfläche des Graphitteilchens beschreiben und sich für kugelförmige Teilchen $f = 1$ ergibt [168].

Hinsichtlich des Einflusses von Gefügeabweichungen (unterschiedliche Nodularität, interzellularer Graphit, Zellgrenzen-carbide) auf die bruchmechanischen Eigenschaften von EN-GJS-400-15 und EN-GJS-700-2 soll hier auf [169] verwiesen werden. Große Anteile von Chunky-Graphitentartung führen, wie aus [170] hervorgeht, neben einer deutlichen Verringerung der Festigkeit und Verformbarkeit, auch zu einer beträchtlichen Verminderung des Risseinleitungs- und Rissausbreitungswiderstandes von EN-GJS-400-15.

Mit dem gestiegenen Einsatz der Gusseisenwerkstoffe mit globularer Graphitbildung hat auch die Schweißeignung dieser Werkstoffgruppe an Bedeutung gewonnen. Bei der Herstellung artgleicher Schweißverbindungen aus ferritischem Gusseisen EN-GJS-400-15, gekoppelt mit einer „in-situ“-Wärmebehandlung nach dem Absetzen der Decklage aus der Schweiß-

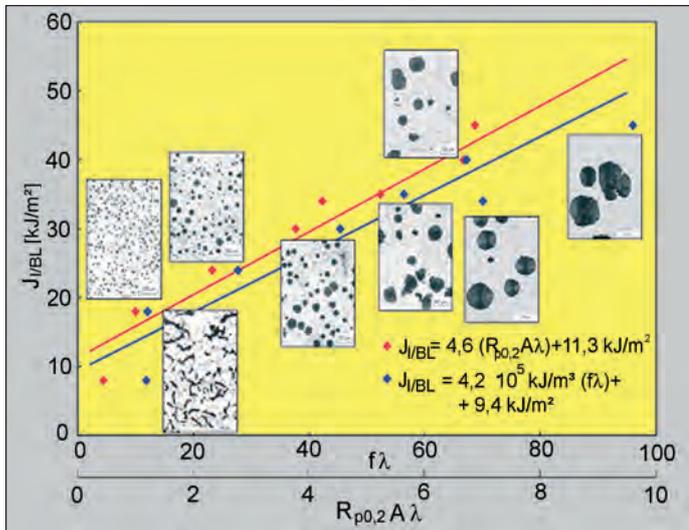


Bild 155: J-Wert ferritischer Gusseisenwerkstoffe mit vermicularer und globularer Graphitbildung in Abhängigkeit vom Produkt aus Bruchdehnung A, 0,2%-Dehngrenze $R_{p0,2}$ und mittlerem Graphitteilchenabstand λ beziehungsweise dem Produkt $f \cdot \lambda$.



Bild 156: Längslenker für PKW aus GJS in belastungsoptimierter und massereduzierter Ausführung durch Nutzung konstruktiver Hohlstrukturen (Bild: Georg Fischer Automotive, Schaffhausen)

wärme, wurde erkannt, dass bei Übereinstimmung der mechanischen Eigenschaften von Grundwerkstoff und Wärmeeinflusszone ein deutlicher Unterschied zum Schweißgut auftritt, der in der erstarrungsbedingten, um den Faktor 10 höheren Graphitteilchenanzahl je mm² begründet ist [171]. Die partielle Bruchgefahr, die von einem derartigen Zähigkeitsmindernden Mismatch-Effekt ausgeht, wird verstärkt, wenn die mögliche Stützwirkung duktiler Nachbarbereiche durch das Auftreten spröder Gefügeanteile in der Wärmeeinflusszone unterdrückt wird. Aus vorliegenden Ergebnissen folgt, dass mit dem abkühlungsbedingten Auftreten perlitischer, bainitischer und martensitischer Gefüge in der ferritischen Matrix der Rissausbreitungswiderstand bei unterschiedlichen Beanspruchungsarten deutlich verringert wird, so dass sowohl der Anteil dieser Gefüge als auch ihre mögliche Anordnung bei der Optimierung der Schweißtechnologie vordergründig zu beachten sind.

Für eine umfassende Bewertung des Festigkeits- und Zähigkeitsverhaltens hochfester ADI-Werkstoffe (siehe 8.2) ist neben der Kenntnis der mechanischen Eigenschaften auch die Einbeziehung bruchmechanischer Kennwerte (**Tabelle 16**) erforderlich, wenn der Einsatz in sicherheitstechnisch relevanten Gussteilen erfolgt.

8.6.3 Zyklische Beanspruchung

Im Rahmen umfassender Betriebsfestigkeitsanalysen kommen bruchmechanische Rissfortschrittskonzepte sowohl zur gefügeabhängigen Bewertung des Rissausbreitungsverhaltens als auch zur Berechnung der Bauteillebensdauer zum Einsatz. Eine wesentliche Voraussetzung hierfür ist die Verfügbarkeit der bruchmechanischen Kennwerte unter Zugrundelegung der da/dN-ΔK-Kurven (**Bild 157**). Die Messung der Risswachstumsgeschwindigkeit da/dN (N Lastspiel) in Abhängigkeit vom zyklischen Spannungsintensitätsfaktor ΔK wurde über die rechnergesteuerte Messung der Resonanzfrequenz als Maß für die von der Risstiefe abhängige Probennachgiebigkeit vorgenommen. Bei der hier erreichten Auflösung von etwa 2 μm ist für den Bereich I der da/dN-ΔK-Kurve die exakte Bestimmung des Schwellenwertes ΔK_{th} möglich. Dieser hat die Bedeutung einer bruchmechanischen Dauerfestigkeit, das heißt bei ΔK < ΔK_{th} tritt kein Risswachstum auf. Die Ermittlung der werkstoffabhängigen Konstanten m und C der Paris-Erdogan-Gleichung (Bereich II der da/dN-ΔK-Kurve)

$$da/dN = C [\Delta K]^m \quad (6)$$

als Basis für das Abschätzen der Restlebensdauer fehlerbehafteter Gussteile erfolgt in Anlehnung an **ASTM E647-86** [172].

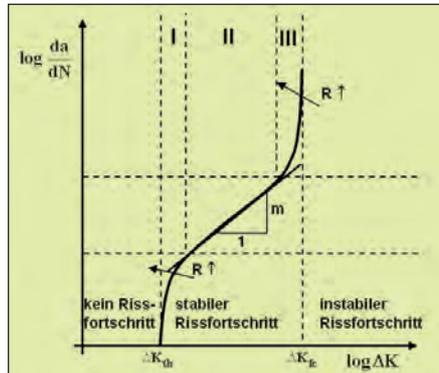


Bild 157: Zyklische Risswachstumskurve (Risswachstumsgeschwindigkeit da/dN in Abhängigkeit vom zyklischen Spannungsintensitätsfaktor)

In der **Tabelle 17** sind die bruchmechanischen Kennwerte in Abhängigkeit von der Mittelspannung (R-Wert) unter Einbeziehung des Restbruch charakterisierenden ΔK_{fc}-Wertes (Bereich III der da/dN-ΔK-Kurve) zusammengestellt, wobei die Kennwerte der da/dN-ΔK-Kurve die Mittelwerte von je drei SENB-Proben der Abmessung 10 x 20 x 100 mm sind. Die Auswertung des Streufeldes von fünf Proben des EN-GJS-400-15 ergab für einen Mittelwert des ΔK_{th}-Wertes von 7,5 N/mm²√m eine Standardabweichung von ± 0,4 N/mm²√m, die in dieser Höhe durch die Gesamtheit der Versuche bestätigt wird. Der relative Fehler liegt in Übereinstimmung mit Messungen an Stahl im Bereich von ± 10 % [173].

Aus Untersuchungen an ferritischem EN-GJS-400-15 mit unterschiedlicher Graphitteilchengröße (d_G = 21 bis 54 μm) folgt, dass mit abnehmender Graphitteilchengröße die ΔK_{th}-Werte kleiner werden. Dies korreliert einerseits mit der korrespondierenden Abnahme des Teilchenabstandes λ und der hieraus nach dem Ritchie-Modell folgenden Abnahme der freien Weglänge der Versetzungen sowie andererseits mit der Zunahme der 0,2-Dehngrenze.

Tabelle 17: Bruchmechanische Kennwerte der zyklischen Risswachstumskurve

Werkstoff EN- ...	R-Wert	ΔK _{th} [N/mm ² √m]	m	C	ΔK _{fc} [N/mm ² √m]
GJS-400-15	0,1	7,5	4,5	2,2 · 10 ⁻¹⁰	40
	0,3	6,2	4,6	3,8 · 10 ⁻¹⁰	31
	0,5	4,5	4,2	1,3 · 10 ⁻⁹	22
GJS-600-3	0,1	6,9	4,1	1,2 · 10 ⁻⁹	34
	0,3	6,6	3,9	1,3 · 10 ⁻⁹	27
	0,5	4,6	3,7	1,9 · 10 ⁻⁹	19
GJS-800-10	0,1	5,4	2,9	0,9 · 10 ⁻⁸	51
	0,3	4,8	3,0	1,1 · 10 ⁻⁸	40
	0,5	4,3	3,2	1,0 · 10 ⁻⁸	29
GJS-1000-5	0,1	5,5	2,9	2,3 · 10 ⁻⁸	45
	0,3	4,0	2,7	3,3 · 10 ⁻⁸	33
	0,5	3,4	2,8	3,9 · 10 ⁻⁸	24

Beide Einflussgrößen verringern die zur Rissbildung erforderliche plastische Deformation, zum Beispiel in Ermüdungsgleitbändern oder an Grenzflächen der Graphitteilchen, wie bei „in-situ“-Versuchen im REM beobachtet wurde [174]. Die bei R = 0,1 ermittelten ΔK_{th}-Werte von mehr als 6 N/mm²√m stimmen mit Messungen in [175] an EN-GJS-400-15 (R_{p0,2} = 299 N/mm², ΔK_{th} = 7,3 N/mm²√m) überein und liegen oberhalb der Werte für Stahl vergleichbarer Festigkeit. Als Ursache kann die teilchenbedingte Behinderung der plastischen Deformation angeführt werden.

Für den Bereich II der da/dN-ΔK-Kurve ist ein weitestgehend Teilchengrößen unabhängiges Risswachstum zu verzeichnen. Erst bei Graphitteilchengrößen d_G = 12 μm im Schweißgut artgleicher Schweißverbindungen aus EN-GJS-400-15 ist ein deutlich höheres Risswachstum zu verzeichnen [173]. Für Graphitteilchengrößen im Bereich von d_G = 21 bis 54 μm kann als Mittelwertkurve

$$da/dN = 6,4 \cdot 10^{-12} (\Delta K)^{6,1} \quad (7)$$

angegeben werden.

Im Rahmen von „in-situ“-Versuchen wurde nachgewiesen, dass die Schädigungsprozesse bei globaler Graphitbildung durch Ablösen der Graphitkugeln von der ferritischen Matrix mit nachfolgender Mikrorissbildung bestimmt werden. Abweichungen von der globalen Graphitbildung führen, wie Untersuchungen an Gusseisen mit vermicularer Graphitbildung (GJV-300) zeigen, infolge des Brechens der Graphitteilchen und Mikrorissbildung, zu höheren Risswachstumsgeschwindigkeiten. Chunky-Graphit im EN-GJS-400-15 bewirkt ebenfalls aufgrund der hohen inneren Kerbwirkung eine deutliche Erhöhung der da/dN-Werte im Bereich II der da/dN-ΔK-Kurve [170].

Aus einer vergleichenden Bewertung des zyklischen Risswachstums im Bereich II

der da/dN- ΔK -Kurven folgt für Gusseisen mit globularer Graphitausbildung und ferritischem, ferritisch-perlitischem und austenitisch-ferritisches Grundgefüge eine weitgehende Gefügeunabhängigkeit [173]. Dagegen folgt aus **Tabelle 17** für den Bereich I die bekannte Abhängigkeit der ΔK_{th} -Werte von der Mittelspannung (R-Wert) und in Hinblick auf die Gefüge die Verringerung von ΔK_{th} mit zunehmender $R_{p0,2}$ -Grenze.

Die Abhängigkeit von der Mittelspannung wird auch für den ΔK_{fc} -Wert (Bereich III) deutlich, der den Übergang zum Restbruch charakterisiert. Die höheren ΔK_{fc} -Werte der ADI-Werkstoffe EN-GJS-800-10 und EN-GJS-1000-5 im Vergleich zu EN-GJS-600-3 deuten, wie auch aus LCF- und Randomversuchen folgt, auf eine höhere Überlastbarkeit hin. Über den Vergleich des Bruchverhaltens dieser ADI-Werkstoffe mit dem Radstahl R7 können Fragen hinsichtlich der möglichen Substitution von Vergütungsstählen in Verbindung mit der hohen Verschleißbeständigkeit und den besseren Dämpfungseigenschaften beantwortet werden.

Dabei ist zu beachten, dass für eine Restlebensdauerberechnung belastbare Informationen zum Risswachstumsverhalten notwendig sind. In der Designphase werden für derartige bruchmechanische Sicherheitsanalysen häufig konservative Referenzkurven verwendet, die als obere Hüllkurven über eine Vielzahl von Messergebnissen einer Werkstoffgruppe abgeleitet wurden. Dabei ist nicht immer ersichtlich, wie groß die Sicherheitsmarge im Einzelfall ausfällt.

Eine statistische Auswertung ist über die Ableitung von Quantitrisswachstumskurven auf der Basis des NASGRO-Computercodes möglich, der als ESACRACK 4.0 [176] verfügbar ist.

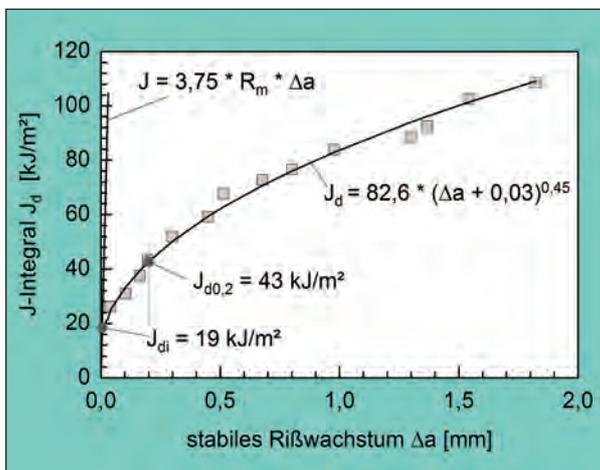


Bild 159: Dynamische Risswiderstandskurve für EN-GJS-800-8

8.6.4 Dynamische Beanspruchung

Bei einer umfassenden Bewertung der Bauteilsicherheit, insbesondere für Unfallszenarien bei denen infolge stoßartiger Belastungen schnelle Änderungen des Spannungs- und Deformationszustandes auftreten, kann die Beanspruchbarkeit des Werkstoffs im Bauteil mit bruchmechanischen Werkstoffkennwerten charakterisiert werden. Für die experimentelle Bestimmung dynamischer Bruchzähigkeitswerte stehen hinsichtlich des Regelwerkes nur erste Ansätze zur Verfügung [178] bis [179], die sich an die Standards für den statischen Belastungsfall anlehnen. Vorliegende Ergebnisse für EN-GJS-400-15 orientieren sich schwerpunktmäßig an der Bruchsicherheitsbewertung von Behältern für den Transport abgebrannter Brennstäbe (**Bild 158**). Untersuchungen an EN-GJS-400-15 mit erhöhtem Perlitanteil im Temperaturbereich von RT bis -50°C an stoßbiegebeanspruchten ($K \approx 5 \cdot 10^4 \text{ N/mm}^2\sqrt{\text{m/s}}$) SENB-Proben (Dicke 140 mm) zeigen, dass bei -40°C probendickenunabhängige K_{Ia} -Werte im Bereich von 50 bis $60 \text{ N/mm}^2\sqrt{\text{m}}$ vorliegen.

Die experimentelle Bestimmung dynamischer Bruchzähigkeitskennwerte mit vertretbaren Probenabmessungen wird über die Aufnahme dynamischer Risswiderstandskurven nach dem CTOD- oder J-Integral-Konzept praktiziert, wobei die Zeit und Material aufwändige Mehrprobentechnik („low-blow“-Technik) zum Einsatz kommt. **Bild 159** enthält die Bestimmung und Definition physikalischer (J_{di}) und technischer ($J_{d0,2}$) Rissinitiiierungswerte am Beispiel eines ADI-Werkstoffs, ermittelt an gestuft schlagbiegebeanspruchten SENB-Proben ($10 \times 10 \times 55 \text{ mm}$) mit Ermüdungsriss („low-blow“-Technik). Für die Entwicklung von rationelleren Einprobenverfahren [180, 181] zum Ermitteln dynamischer Risswiderstandskurven für Gusseisen gibt es gegenwärtig Vorschläge mit unterschiedlichem Aufwand und Erfolg.

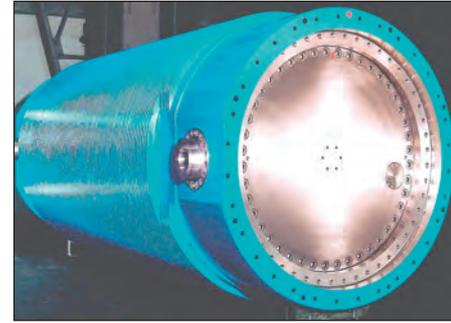


Bild 158: An Castor-Behälter werden extrem hohe Anforderungen an Festigkeit und Sicherheit gestellt, die von den Gießereien erfüllt werden (**Bild:** Siempelkamp, Krefeld)

Die dynamischen Rissinitiiierungswerte für ferritisches EN-GJS-400-15 zeigen in Analogie zu den statischen Werten eine deutliche Gefügeabhängigkeit und machen im direkten Vergleich deutlich, dass die stoßartige Beanspruchung sowohl bei RT als auch bei tiefen Temperaturen zu einer deutlichen Verringerung des Risseinleitungswiderstandes führt [182]. Bestätigt wird dies auch im Ergebnis der bruchmechanischen Bewertung einer artgleichen Schweißverbindung aus EN-GJS-400-15 bei statischer und dynamischer Beanspruchung [183]. Hier ist vor allem der zähigkeitsverringende Einfluss kleiner Graphitteilchen im Schweißgut und erhöhter Perlitanteile auf den Risseinleitungswiderstand der Schweißverbindung bei dynamischer Beanspruchung in Verbindung mit dem Werkstoffverhalten bei tiefen Temperaturen zu beachten.

Auf den Einfluss dynamischer Beanspruchungen hinsichtlich des Risseinleitungs- und Rissausbreitungswiderstandes duktiler Gusseisenwerkstoffe wird auch in [184 - 186] hingewiesen und auf den zusätzlich zähigkeitsverringenden Einfluss tiefer Umgebungstemperaturen und großer Bauteildicken in [187, 188] aufmerksam gemacht. Beachtenswert sind in diesem Zusammenhang auch Untersuchungen [189, 190] zur Bestimmung der Rissauffangzähigkeit K_{Ia} nach **ASTM E1221-88** zur Bewertung

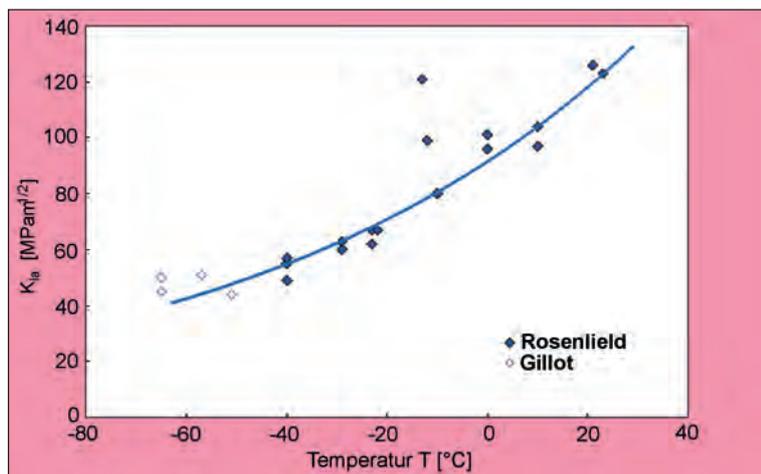


Bild 160: Rissauffangzähigkeit in Abhängigkeit von der Temperatur [189], [190]

des temperaturabhängigen Rissstopp-Verhaltens (Rissarrest) von EN-GJS-400-15 (Bild 160).

Die bisher praktizierte Anwendung bruchmechanischer Kennwerte im Rahmen der Berechnung zulässiger Fehlerabmessungen in Gussteilen macht im direkten Vergleich mit Stahl oder Stahlguss deutlich, dass duktiler Gusseisen in Bezug auf seine Sprödbruchsicherheit höher zu bewerten ist, als es die relativ niedrige Kerbschlagzähigkeit erwarten lässt (Bild 161), wie zum Beispiel aus Untersuchungen im Rahmen der Werkstoffzulassung von duktilem Gusseisen für Schleudergussrohre folgt [191].

In Umsetzung bruchmechanischer Untersuchungsergebnisse konnten 1985 bei der Neufassung des **AD-Merkblattes W3/2** die für ferritische Gusseisensorten mit Kugelgraphit im Druckbehälterbau festgelegten Sicherheitsbeiwerte von $S = 3,5$ auf $2,4$ bei Auslegung gegen die $0,2\%$ -Dehngrenze verringert werden. Für den Transport und die Lagerung radioaktiver Abfälle kommen in Deutschland überwiegend Behälter aus duktilem Gusseisen (Bild 158) mit Kugelgraphit zur Anwendung, für die umfassende Bruchsicherheitsbewertungen unter Einbeziehung bruchmechanischer Festigkeitsberechnungen erforderlich sind. Während bis 2002 ausschließlich die bruchmechanische Bewertung auf der Basis des statischen Belastungsfalles erfolgte, sieht die überarbeitete Leitlinie der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) auch die Einbeziehung stoßartiger Beanspruchungen vor [159]. Gegenstand laufender Untersuchungen sind sowohl die numerische Beanspruchungsanalyse der Behälter unter Einbeziehung hypothetischer Gussfehler [192, 193] als auch die Bestimmung dynamischer Bruchzähigkeitskennwerte in Abhängigkeit von der Prüftemperatur und dem Gussgefüge des EN-GJS-400-15 [194].



Bild 161: Verformung an einem Querlenker aus höherfestem GJS unter Last ohne Bruch (Bild: Georg Fischer Automotive, Schaffhausen)

Als ein weiteres Beispiel für die Anwendung bruchmechanischer Bemessungsverfahren kann die Planung und der Bau einer Turbinenrohrleitung aus duktilen Gussrohren angeführt werden [195]. Beim Bau eines 16-MW-Laufkraftwerks im Vorarlberg führten besonders hohe Sicherheitsanforderungen und schwierige Einbaubedingungen in alpinem Gelände zu der Entscheidung, die Turbinenleitung im Nennweitenbereich bis DN 1600 bei Betriebsdrücken über 30 bar nicht mit geschweißten Stahlrohren, sondern mit duktilen Schleudergussrohren aus optimiertem EN-GJS-400-15 zu bauen. Die bruchmechanische Bewertung erfolgte auf Basis des „Leck-vor-Bruch“-Kriteriums nach Ermittlung der bruchmechanischen Kennwerte [196]. Im Ergebnis der durchgeführten bruchmechanischen Sicherheitsbewertungen, gestützt durch Berstversuche an der Technischen Versuchs- und Forschungsanstalt der TU Wien, erfolgte die Verwendung von Schleudergussrohren.

Die Anwendung bruchmechanischer Bewertungskonzepte bei der Entwicklung von Eisenbahnradern aus austenitisch-ferritischem Gusseisen (ADI) erfolgte auf der Basis numerischer Beanspruchungs-



Bild 162: Fahrwerksteil aus EN-GJS-800-8 zum Nachweis der Eignung von ADI-Sorten (Bild: CLAAS GUSS, Bielefeld)

analysen. Zur sicherheitstechnischen Auslegung des ADI-Rades ($R_{p0,2} = 637 \text{ N/mm}^2$, $R_m = 893 \text{ N/mm}^2$) gegen Gewaltbruch und Ermüdungsrisswachstum wurde eine linear-elastische bruchmechanische Analyse für hypothetische rissartige Fehler an exponierten Stellen durchgeführt [197]. Aus den berechneten bruchmechanisch relevanten Risslängen kann im Zusammenhang mit wiederkehrenden betrieblichen Überwachungsmaßnahmen und Sicherheitskonzepten eine zulässige Rissgröße abgeleitet werden. Die hier ermittelten kritischen Rissgrößen können mittels zerstörungsfreier Prüfverfahren sicher und zuverlässig diagnostiziert und die Eignung von ADI als alternativer Radwerkstoff bestätigt werden [198] (Bild 162).

Abschließend soll auf die jetzt im Vorschriftenwerk [165] integrierte bruchmechanische Beanspruchungsanalyse potenzieller Ermüdungsbrüche von Komponenten aus EN-GJS-400-18LT in Windenergieanlagen hingewiesen werden, um Schadensfälle zu vermeiden beziehungsweise die Rissausbreitungsgeschwindigkeit in die umfassende Betriebsfestigkeitsanalyse einzubinden [199] (Bilder 163 und 164).



Bild 163: Diverse Bauteile für einen Betonmischerantrieb aus EN-GJS-700-2 und EN-GJS-500-7 im bearbeiteten Zustand mit Verzahnung (Bild: CLAAS GUSS, Bielefeld)



Bild 164: Im Gondelbereich von Windenergieanlagen sind neben dem Maschinenträger, Stratorstern, Achszapfen und Blattadapter sowie die Drehmomentstütze und der Planetenträger der Getriebe hoch belastbare Gussteile aus GJS. (Bild: ZGV, Düsseldorf)

8.7 Betriebsfestigkeit

Betriebsfestigkeit ist der Oberbegriff für ein Spektrum von Beanspruchungen, das ein Bauteil während der ihm zugeordneten Lebensdauer ohne Versagen ertragen muss. Wesentliche Parameter sind der Werkstoff, die Gestaltung (Bauteilgeometrie), Fertigung (Gießen, Schmieden, Schweißen, Oberflächen- oder Randschichtbehandlungen) und Belastung (zum Beispiel mechanisch mit überlagerter Umwelteinfluss) [200- 202]. Die Kosten sind letztendlich dafür verantwortlich, dass Produkte nicht optimal, sondern optimiert auf den Markt kommen (**Bild 165**). Trotz jahrzehntelanger Forschungsaktivitäten ist eine Freigabe von Sicherheitsbauteilen auf Basis eines rein numerischen Betriebsfestigkeitsnachweises nicht möglich. Sowohl verkürzte Entwicklungszeiten bei gleichzeitig zu gewährleistender Zuverlässigkeit des Produkts als auch die Komplexität und Funktionsintegration bei Baugruppen fordern aber verstärkt deren numerische Behandlung, um zukünftige Entwicklungsprozesse kompetent begleiten zu können. Die Methodenentwicklung zur Erweiterung der Grundlagen zur Gestaltung, Dimensionierung und Optimierung erstreckt sich hierbei auf Parameter wie Fertigung, Randschichtzustand, Größeneinfluss und Festigkeitshypothesen. Die Übertragbarkeit von Schwingfestigkeitskennwerten auf Bauteile ist eng mit lokalen Werkstoff- und Gefügeeigenschaften und auch Versagensmechanismen verknüpft und bedingt dadurch die Unterstützung von Metallographie und Rasterelektronenmikroskopie.

Das heutige Verständnis zur Betriebsfestigkeit hebt sich von der ursprünglich von Ernst Gaßner 1939 eingeführten Definition, dem Festigkeitsverhalten unter zeit-

lich veränderlichen (variablen) Belastungsbeziehungswise Beanspruchungsamplituden ab. Sie umfasst

- **Sonderbelastungen** wie Überlasten, die zum Beispiel die Formdehngrenze des Bauteils ansprechen (beispielsweise an Fahrwerkskomponenten beim langsamen Überfahren eines Hindernisses), Beulen oder Knicken einer Struktur und Missbrauch durch dynamische Belastung (Impactbelastung mit hoher Geschwindigkeit und Energie, zum Beispiel beim schnellen Überfahren eines Schlagloches), wobei ein verformungsloser Sprödbruch durch Konstruktion und Werkstoffwahl ausgeschlossen sein muss. Das heißt, ein duktiler Bruch wäre noch zulässig.
- **Kriechbelastungen** wie zum Beispiel bei Turbinenschaufeln unter hoher Temperatur und Fliehkraft.
- **Verschleiß** bei Reibpaarungen, zum Beispiel an Zahnrädern.
- **Zyklische Belastungen (Schwingfestigkeit)** mit konstanten oder variablen Amplituden mit überlagerten montage- oder belastungsbedingten Mittelwerten können zur Werkstoffermüdung, Rissinitiation und somit zum Versagen von Bauteilen führen. Das Festigkeitsverhalten unter konstanten Amplituden wird durch die Wöhlerlinie und unter variablen Amplituden durch die Gaßnerlinie beschrieben (**Bild 166**). Die Wöhlerlinie wird in die Bereiche Kurzzeitfestigkeit (elasto-plastische Beanspruchungen mit größerem plastischem Anteil, definiert bis $5 \cdot 10^4$ Schwingspiele), Zeitfestigkeit (elasto-plastische Beanspruchungen, Lebensdauer zwischen $5 \cdot 10^4$ und $2 \cdot 10^6$ Schwingspielen) und sogenannte „Dauerfestigkeit“ (makros-

kopisch elastische Beanspruchungen bei Lebensdauern größer als $2 \cdot 10^6$ Schwingspielen) unterteilt. In diesem Bereich muss mit einem kontinuierlichen, werkstoff-, fertigungs- und umgebungsabhängigen Abfall der Schwingfestigkeit gerechnet werden. Das heißt, es existiert keine Dauerfestigkeit [203]. Die Gaßnerlinie kann sich zwischen 10^4 und mehr Schwingspielen erstrecken, wobei die Belastungsvorgänge deterministisch oder stochastisch auftreten können. Typische Bauteile im Bereich der Kurzzeitschwingfestigkeit sind Reaktor-druckbehälter, der Zeitfestigkeit Türscharniere von Fahrzeugtüren, der sogenannten Dauerfestigkeit Zahnräder, Kurbelwellen oder Pleuel. Typische Komponenten, die gegen variable Betriebsbelastungen bemessen werden, sind Fahrwerksteile, wie Räder, Lenker, Vorder- und Hinterachsträger oder Achsschenkel.

Die beschriebenen Belastungsarten (Sonderbelastung, Kriechen, Verschleiß, Schwingbelastung) treten im Betrieb selten einzeln auf. Sie können durchaus nacheinander oder gemeinsam auftreten, so dass ihre Lebensdauer bestimmende Interaktion stets beachtet werden muss.

Belastungen und Beanspruchungen mit nur konstanten Amplituden, sei es im Bereich der Kurzzeitschwingfestigkeit, der Zeitfestigkeit oder der sogenannten Dauerfestigkeit treten hingegen sehr selten auf. Im Betrieb liegt meistens eine Mischung aus Amplituden unterschiedlicher Höhe vor, die mit dem Begriff Kollektiv (Häufigkeitsverteilung von Amplituden) beschrieben wird und deren Kenntnis für das Ermitteln der zutreffenden Gaßnerlinien Voraussetzung ist.

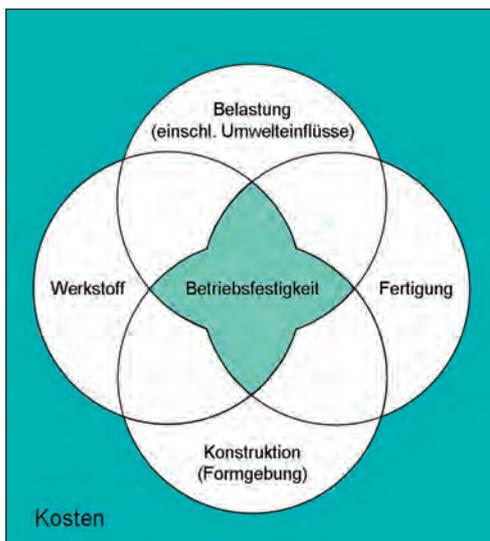


Bild 165: Einflussgrößen auf die Betriebsfestigkeit

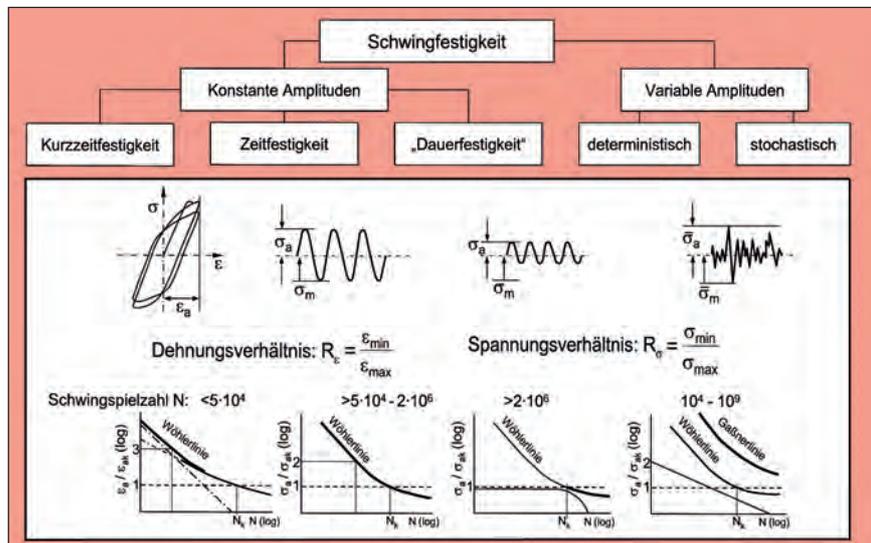


Bild 166: Unterteilung der Schwingfestigkeit

8.7.1 Einflussgrößen auf die Betriebsfestigkeit

8.7.1.1 Werkstoff

Bei metallischen Werkstoffen geht in aller Regel mit einer Erhöhung der statischen Festigkeitskennwerte auch ein Erhöhen der Schwingfestigkeit einher. Allerdings trifft dies auch bei Gusswerkstoffen nur für ungekerbte oder schwach gekerbte Bauteilbereiche zu. Ab einer bestimmten Kerbschärfe kann durch eine Steigerung der Zugfestigkeit mit Hilfe einer entsprechenden Legierung oder Wärmebehandlung die Schwingfestigkeit nicht mehr angehoben werden (Bild 167). Folglich ist die höhere Festigkeit eines Werkstoffes nur dann ausnutzbar, wenn Spannungs-konzentrationen konstruktiv, zum Beispiel durch größere Radien, abgebaut werden. In Fällen, in denen ein Abbau der Spannungs-konzentration konstruktiv nicht möglich ist, können mechanische oder thermo-chemische Oberflächenbehandlungs-verfahren nachgeschaltet werden, wobei Werkstoffe mit höheren Festigkeiten bzw.

Streckgrenzen, wegen ihrer Fähigkeit entsprechend höhere Druckeigenspannungen aufzubauen, auch größere Steigerungen in der Schwingfestigkeit erfahren als Werkstoffe mit geringeren Festigkeiten [204].

Eine weitere wichtige Kenngröße für die Bemessung von Gussbauteilen ist die Mittelspannungsempfindlichkeit M , die zur Beurteilung des Einflusses von montage- oder belastungsbedingten Mittelspannungen auf die ertragbare Schwingfestigkeit dient (Bild 168). Sie beschreibt das Verhältnis der unter Wechselbelastung ($R = -1$) und Schwellbelastung ($R = 0$) ertragbaren Spannungsamplitude σ_a für einen Werkstoff. Sie liegt bei Gusseisen überwiegend zwischen $M = 0,25$ (ferritische Matrix) und $M = 0,50$ (perlitische Matrix) und hängt somit auch von der Werkstofffestigkeit ab. Zugmittelspannungen σ_m mindern bei allen metallischen Konstruktionswerkstoffen die ertragbare Spannungsamplitude σ_a , Druckmittelspannungen erhöhen sie. Wenn in der Praxis auftretende Spannungs-verhältnisse von reiner Wechselbelastung

($R = -1$) oder Schwellbelastung ($R = 0$) abweichen, können die zur jeweiligen Mittelspannung gehörigen Schwingfestigkeitsamplituden durch Inter- bzw. Extrapolation näherungsweise aus einem Haigh-Diagramm abgeleitet werden (Bild 189), wobei für Kennwerte außerhalb des Bereiches $-1 \leq R \leq 0$ ein Nachweis empfohlen wird.

8.7.1.2 Geometrie, Formgebung

Die Formgebung und damit oftmals verbundene konstruktiv bedingte Kerben beeinflussen die Schwingfestigkeit maßgeblich. Durch das Einbringen von Kerben und mit zunehmender Kerbschärfe (zum Beispiel Absätze, Bohrungen) verringert sich die ertragbare äußere Belastung. Bei sehr scharfen Kerben kann die Schwingfestigkeit einer Konstruktion nicht mehr durch die Wahl eines höherfesten Gusswerkstoffes angehoben werden (Bild 167).

Aufgrund der inneren Kerben, die bei Eisengusswerkstoffen durch den eingelagerten Graphit vorliegen, ist die relative Minderung der Schwingfestigkeit durch bearbeitungsbedingte Kerben niedriger als bei gewalzten oder geschmiedeten Stählen. Die im Vergleich zu Stählen gefügebedingte geringere Kerbempfindlichkeit von Gusswerkstoffen führt im gekerbten Zustand teilweise zu einem mit Stählen vergleichbaren Schwingfestigkeitsverhalten. Dies ermöglicht in Verbindung mit den Gestaltungsfreiräumen der Gusstechnik auch bei hoch belasteten Bauteilen Werkstoffsubstitutionen.

8.7.1.3 Fertigung

Aufgrund der Reaktion der Schmelze während des Gießprozesses mit den Formwerkstoffen oder bei Vorgängen während der Erstarrung können sich an der Gussoberfläche und im oberflächennahen Bereich Verunreinigungen, Mikroporen oder Zonen mit Gefügeentartungen bilden. Gegenüber dem fein gedrehten oder geschliffenen Oberflächenzustand kann der Gusszustand eine um etwa 20 % niedrigere Schwingfestigkeit aufweisen. Durch eine Oberflächenverfestigung, beispielsweise durch Reinigungsstrahlen, kann gegenüber dem Gusszustand eine Schwingfestigkeitserhöhung um rund 30 % erreicht und somit auch die Rauheit kompensiert werden. Diese Steigerungsbeiträge sind nur dann möglich, wenn bedingt durch die Belastungsart und Bauteilgeometrie (Kerben) steile Spannungsgradienten vorliegen und keine festigkeitsmindernden Inhomogenitäten vorhanden sind. Bei dickwandigen Gussbauteilen sind daher zum Beispiel durch Kugelstrahlen weitaus geringere Steigerungen zu erwarten. Die Effektivität der Strahlbehandlung hängt von der Abstimmung der

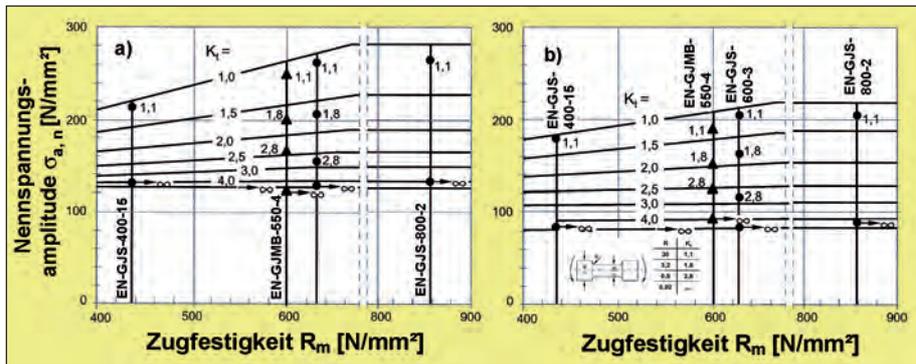


Bild 167: Einfluss der Zugfestigkeit und Formzahl auf die Schwingfestigkeit von Eisengusswerkstoffen (nach Hück, Schütz, Walter)
a) bei Wechselbelastung ($R = -1$)
b) bei Schwellbelastung ($R = 0$)
Belastungsart: Planbiegung, Oberfläche: feingedreht, $R_z = 10 \mu\text{m}$, $N = 2 \cdot 10^6$, $P_0 = 50 \%$

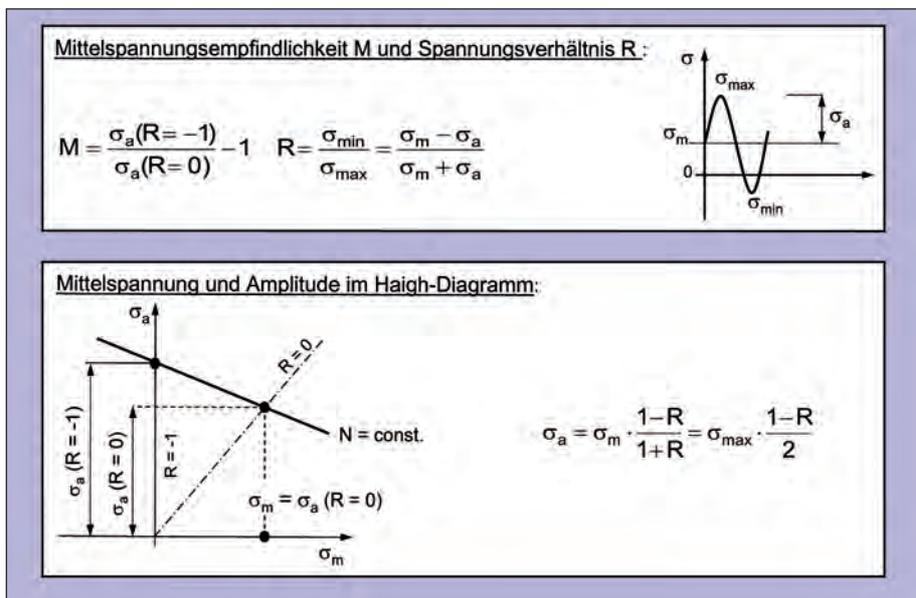


Bild 168: Parameter des Haigh-Diagramms



Bild 169: Bodenteil einer Erzmühle, bestehend aus vier Gussteilen aus EN-GJS-500-7, Gesamtgewicht etwa 200 t (Bild: Siempelkamp Krefeld)

Prozessparameter mit dem jeweiligen Werkstoff und der Bauteilgeometrie ab. Ungängen oder Entartungen, die im Fertigungsprozess im Werkstoff entstehen können, wirken sich ebenfalls auf das Schwingfestigkeitsverhalten aus [205]. Die Zusammenhänge von zulässiger Beanspruchung in Abhängigkeit vom Gefügestand, Oberflächenbeschaffenheit und Ungängen oder Entartungen sind für dickwandige Bauteile aus EN-GJS-400-15 in [206] ausführlich dargestellt.

In der Großserienfertigung von Gussbauteilen gibt es auch andere, wirkungsvollere Möglichkeiten, die Schwingfestigkeit zu steigern, so durch Festwalzen, Induktionshärten oder durch eine Kombination von beiden Behandlungsarten. Je nach Werkstoff, Geometrie und Belastung (wechselnd oder schwellend, konstante oder variable Amplituden) können hierdurch Steigerungen bis etwa Faktor 2,5 in der ertragbaren Spannungsamplitude erreicht werden [207]. Dominiert wird diese Steigerung durch die verfahrensabhängig eingebrachten Druckeigenspannungen in die Randschicht. Durch diese Maßnahmen kann die Schwingfestigkeit häufig wirksamer gesteigert werden als durch konstruktive Maßnahmen.

Grundsätzlich sind alle Randschichtzustände in ihrer Auswirkung auf die Schwingfestigkeit unter dem Gesichtspunkt „fertigungsinduzierter“ (Fräsen, Drehen, Schleifen, usw.) Eigenspannungen zu bewerten.

8.7.1.4 Belastung

Neben den aufgetragenen äußeren Beanspruchungen (konstante oder variable Amplituden, einachsige oder mehrachsige Belastung) zählen hierzu auch die Umgebungseinflüsse wie Temperatur- oder Medieneinflüsse. Unter langen Haltezeiten können bei stationärem Betrieb bei hohen Temperaturen zusätzlich auch

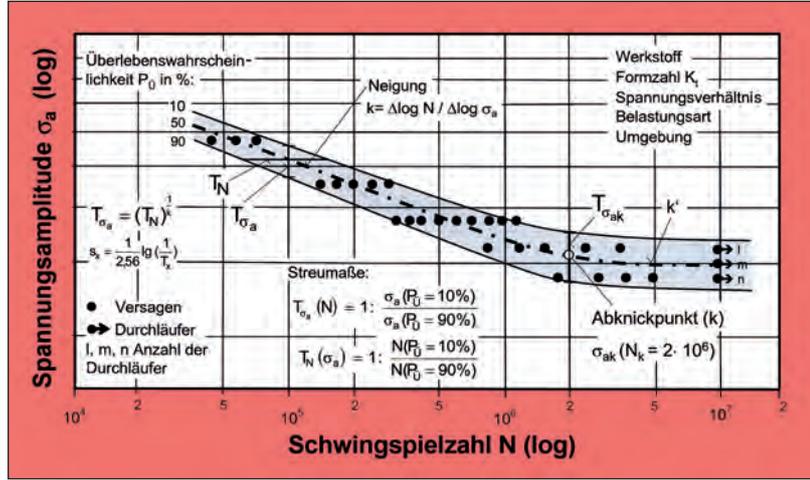


Bild 170: Wöhlerlinienparameter

Oxidations- und Krieeffekte auftreten. Für Gusseisen mit Kugelgraphit fällt die Schwingfestigkeit bei höheren Temperaturen ab etwa 100 °C kontinuierlich ab. Gegenüber Raumtemperatur muss bei 300 °C mit rund 10 %, bei 500 °C rund 25 % bis 30 % Minderung gerechnet werden.

Chloridhaltige wässrige Lösungen setzen, je nach Chloridkonzentration, die Lebensdauer und die Korrosionsschwingfestigkeit sehr stark herab, da der Abknickpunkt der Wöhlerlinie extrem zu höheren Schwingspielzahlen hin verschoben wird. Unter Schwellbelastung sind die durch korrosives Umgebungsmedium hervorgerufenen Schwingfestigkeitsverluste niedriger als unter Wechselbelastung. Inwiefern Beschichtungen, wie zum Beispiel Verzinken, ein effektiver Schutz gegen Korrosionsermüdung sein kann, muss im Einzelfall untersucht werden.

Eine weitere Korrosionsart unter zyklischer Belastung ist die Reibkorrosion, die häufig aufgrund von Relativbewegungen zwischen Werkstoffpaarungen auftritt. Grundsätzlich verhalten sich Eisengusswerkstoffe hinsichtlich der Reibkorrosion wegen der Schmierwirkung der Graphiteinlagerungen günstiger als Stahl. Die Reibkorrosion kann durch Kugelstrahlen (Oberflächenverfestigung und induzierte Druckeigenspannungen) sehr effektiv verringert werden.

8.7.2 Zyklische Kennwerte

8.7.2.1 Darstellung zyklischer Kennwerte

Die Wöhlerlinie wird doppellogarithmisch als Belastungs- oder Beanspruchungsamplitude (häufig Spannung) über der Lebensdauer (häufig Schwingspielzahl) aufgetragen, wobei für die Lebensdauer ein Versagenskriterium (Bruch, Anriss einer definierten Größe, Steifigkeitsabfall, usw.) definiert werden muss. Die maßgeblichen

Einflussparameter sind der Werkstoff, die Formzahl K_f (sofern deren Definition möglich ist), das Belastungs- oder Beanspruchungsverhältnis $R = X_{\min} / X_{\max}$ (Information über den Mittelwert, dem sich die Amplitude überlagert), die Belastungsart (axial, Biegung, Torsion) und die Umgebung (Temperatur, Medien). Belastungen sind einwirkende Größen wie Kraft, Moment, Druck, oder die am Bauteil entstehenden Größen (Beanspruchungen) wie Dehnung, Spannung oder Verformung (**Bild 170**).

Die Parameter zur Beschreibung einer Wöhlerlinie sind die Neigung k im Bereich der Zeit- oder Kurzzeitfestigkeit, der Abknickpunkt N_k , die Beanspruchbarkeit am Abknickpunkt (z.B. σ_{ak}) und die Neigung k' nach dem Abknickpunkt. Diesen zugeordnet ist eine Überlebens- oder Ausfallwahrscheinlichkeit P_U oder P_A . Die Höhe und Lage des Abknickpunktes sowie Neigungen sind abhängig von den oben genannten Einflussparametern. Bei GJS-Werkstoffen liegt der Abknickpunkt überwiegend bei $N = 2 \cdot 10^6$ Schwingspielen. Die Streuung der Ergebnisse T ist werkstoff- und fertigungsabhängig und für eine Sicherheitsbetrachtung, die häufig auf der logarithmischen Normalverteilung basiert, notwendig. Unter dieser Annahme lässt sich aus dem Streumaß T , definiert als der Bereich zwischen den Überlebenswahrscheinlichkeiten $P_U = 10\%$ und 90% , $T_x = 1 : X(P_U = 10\%) / X(P_U = 90\%)$, die Standardabweichung berechnen (**Bild 170**). Im Bereich der Zeit- und Kurzzeitfestigkeit sind die Streumaße T_N und T_{σ_a} über die Neigung k miteinander gekoppelt. Diese Streumaße werden bis zum Abknickpunkt mit zunehmender Lebensdauer größer. Wegen des flachen Verlaufes der Wöhlerlinie nach dem Abknickpunkt macht die Angabe einer Streuung der Lebensdauer N für den Bereich $N > N_k$ keinen Sinn mehr und ist daher auf die Streuung der Belastungs- oder Beanspruchungsamplitude beschränkt. Sie wird nicht größer als die

Streuung im Übergangsbereich von der steilen zur flachen Neigung der Wöhlerlinie. Das im Bereich der Zeitfestigkeit kurz vor dem Abknickpunkt ermittelte Streumaß kann nach dem Abknickpunkt somit als konstant angenommen werden. Diese Annahme ist sinnvoll, weil das Treppenstufenverfahren sowie seine Modifikationen, die zur Bestimmung ertragbarer Last-, Dehnungs- oder Spannungsamplituden für eine festgesetzte Grenzwahrscheinlichkeit am oder nach dem Abknickpunkt verwendet werden, nur einen zuverlässigen Mittelwert, aber kein zuverlässiges Streumaß liefern.

Die genannten Parameter gelten sinngemäß auch für die Ermittlung und Beschreibung von Gaßnerlinien (Kennzeichnung durch „-“ und bedeutet „Höchstwert der Beanspruchung“). Bei Gaßnerlinien sind die Streuungen geringer als bei Wöhlerlinien und je nach Kollektivform verlaufen sie flacher ($K \geq k$). Beide werden allgemein als Lebensdauerlinien bezeichnet. Erst im doppellogarithmischen Netz ergeben sich bei deren Darstellung die geradlinigen Verläufe mit den Neigungen k, k' oder \bar{k} . Auf der Belastungs- und Beanspruchungsachse werden in der Regel Amplituden aufgetragen. Ein eventuell überlagerter Mittelwert geht aus dem R-Wert hervor.

Beim Ermitteln von Gaßnerlinien muss eine Teilfolge, beispielsweise als Spitzenwertfolge mit definiertem Teilfolgenumfang, vorliegen. Ein Belastungskollektiv ist die Summe der ertragenden Teilfolgen. Die Versuche werden auf unterschiedlichen Belastungshorizonten durchgeführt, wobei sich die Anzahl der Wiederholungen der Teilfolge und die Größe der Amplituden horizontabhängig ändern. Ein höherer Horizont bedeutet lediglich eine lineare Vergrößerung, ein niedrigerer eine lineare Verkleinerung aller Amplituden und der zugehörigen Mittelwerte (**Bild 171**). Eine Teilfolge muss, um einen betriebsähnlichen Ablauf abzubilden (betriebsähnliche Durchmischung), mindestens 5 bis 10-mal bis zum Versagen wiederholt werden.

Die Ergebnisse der Gaßnerversuche werden (zumindest im deutschsprachigen Raum) als Amplitudenhöchstwert der jeweils verwendeten Teilfolge über der sich ergebenden Schwingungszahl beim Versagen aufgetragen. Unter Berücksichtigung des R-Wertes ermöglicht dies einen Vergleich mit der statischen Beanspruchbarkeit, zum Beispiel Werkstoff- oder Formdehngrenze. Darüber hinaus ist erkennbar, um wie viel der Höchstwert den Abknickpunkt der Wöhlerlinie (die sogenannte Dauerfestigkeit) überschreitet. Die genaue Lage von Gaßnerlinien in Abhängigkeit der verwendeten Teilfolge kann theoretisch über Schadensakkumulation berechnet, zuverlässig aber nur durch Versuche bestimmt werden.

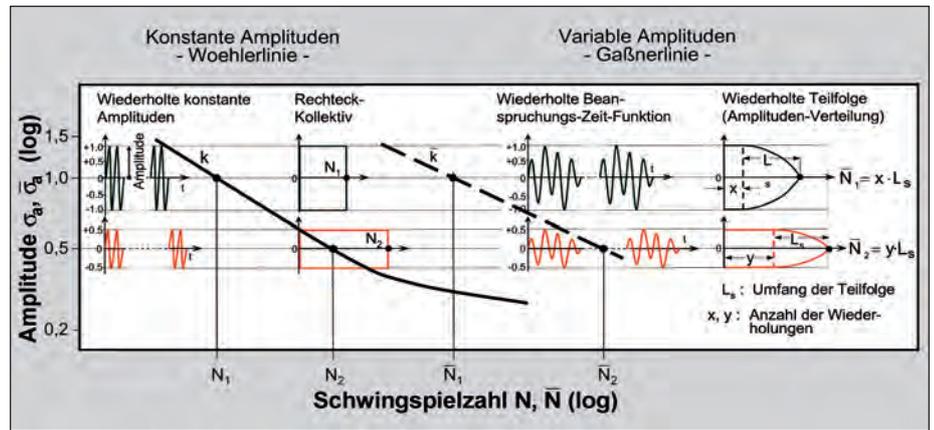


Bild 171: Schematische Darstellung von Versuchsergebnissen unter konstanten und variablen Amplituden

8.7.2.2 Dehnungswöhlerlinien

Zum Bewerten des Werkstoffverhaltens für Beanspruchungen, die die Streckgrenze überschreiten können oder unter wiederholten elasto-plastischen Beanspruchungen ist die Kenntnis der zügigen und zyklischen Spannungs-Dehnungskurven und von dehnungsgeregelt aufgenommenen Anrisswöhlerlinien erforderlich. Sie sind eine Basis für die Bauteilbemessung nach dem örtlichen Konzept. Mit ungekerbten Proben wird das zyklische Verhalten im Kerbgrund von Bauteilen durch die Dehnungsregelung, die auch in hochbeanspruchten Bereichen von Bauteilen aufgrund von Spannungsgradienten vorherrscht, simuliert. Die Koeffizienten und Exponenten nach Coffin-Manson-Basquin, mit denen die Dehnungswöhlerlinie beschrieben wird, sowie der Koeffizient und Exponent nach Ramberg-Osgood für die zügige und zyklische Spannungs-Dehnungskurve finden Eingang in kommerzielle Bemessungsprogramme. Die Gegenüberstellung der zügigen und zyklischen Spannungs-Dehnungs-Kurven zeigt, ob ein Werkstoff bei wiederholter elasto-plastischer Beanspruchung Festigkeit aufbaut (zyklische Verfestigung), abbaut (zyklische Entfestigung) oder sich neutral verhält. Diese Kurven werden außerdem für die Berechnung von Kerbgrundbeanspruchungen, zum Beispiel durch die Anwendung der Neuber-Regel oder deren Modifikationen, verwendet [208]. In der Regel weisen Eisengusswerkstoffe eine zyklische Verfestigung auf.

8.7.2.3 Bedeutung der Versuche mit variablen Amplituden

Die Bedeutung der Versuche mit variablen Amplituden liegt darin, dass sich gegenüber konstanten Amplituden, bei gleichem Höchstwert eine deutlich höhere Lebensdauer ergibt. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die kleineren Amplituden im Gaßnerversuch weniger schäd-

igen als die ständig mit gleicher unveränderter Größe auftretenden Amplituden des Wöhlerversuchs. Um wie viel sich die Lebensdauer im Gaßnerversuch gegenüber dem Wöhlerversuch vergrößert, hängt von der verwendeten Teilfolge ab.

Im Falle einer Geradenverteilung (GV) ist der Anteil von kleineren Amplituden im Vergleich zur Normalverteilung (NV) größer (**Bild 172**). Entsprechend weist die zugehörige Gaßnerlinie eine höhere Lebensdauer auf. Dieser Vorteil über die Kenntnis der Kollektivform und ihrem Einfluss auf die Lebensdauer bei gegebener Belastung lässt sich auch bei der Bauteildimensionierung ausnutzen. Wenn beispielsweise für eine Spurstange eines Fahrzeuges eine Lebensdauer von 10^8 Schwingspielen erforderlich und die Höchstbelastung $\bar{F}_a = 100$ kN durch Betriebsmessungen bekannt ist, kann aus der Wöhlerlinie mit der ertragbaren Spannungsamplitude von $\sigma_a = 260$ N/mm² ein Durchmesser von $d = 22$ mm berechnet werden. Da aber eine Spurstange im Betrieb Belastungen mit variablen Amplituden ausgesetzt ist (Messungen belegen im vorliegenden Fall eine Geradenverteilung), kann bei Kenntnis der entsprechenden Gaßnerlinie für eine Lebensdauer von 10^8 Schwingspielen die ertragbare Spannungsamplitude von $\bar{\sigma}_a = 500$ N/mm² als Kollektivhöchstwert zugrunde gelegt und damit ein Durchmesser von $d = 16$ mm berechnet werden. Diese Querschnittsverringerung wird durch das Zulassen einer Überschreitung der Wöhlerlinie bei 10^8 Schwingspielen um den Faktor 1,9 ermöglicht. Die Reduzierung des Querschnittes von 22 auf 16 mm bedeutet gleichzeitig eine Verringerung des Gewichtes für diesen Bauteilbereich um Faktor 1,9. Diese Berücksichtigung von zeitlich veränderlichen Amplituden in der konstruktiven Praxis ist der Verdienst von E. Gaßner (1939) und der bedeutendste Fortschritt in der Bauteilbemessung nach A. Wöhler (1866).

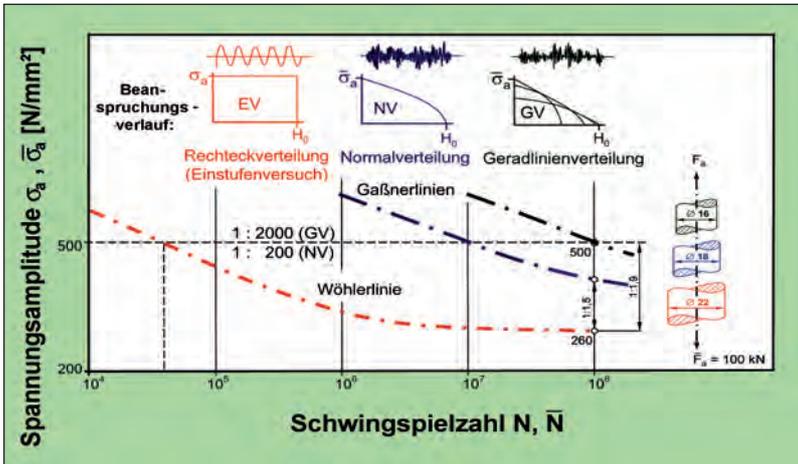


Bild 172: Einfluss der Kollektivform auf die Lebensdauer und Bauteilabmessungen

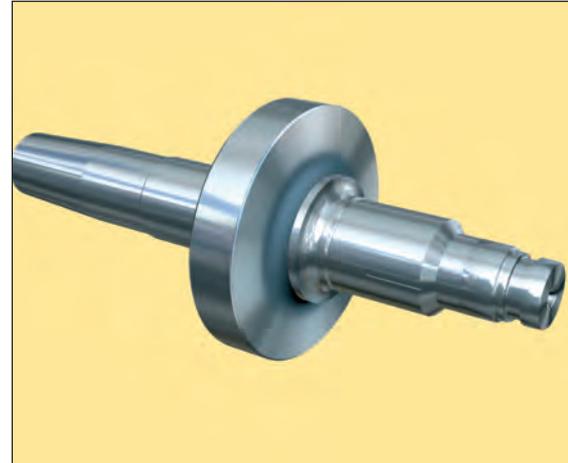


Bild 173: Verbundgusswalzenring aus EN-GJS-400-15 auf eine Schmiedestahlachse aufgeschraubt, Gewicht 1,8 t (Bild Gontermann-Peipers, Siegen)

8.7.2.4 Größeneinfluss und Übertragbarkeit

Der Größeneinfluss, ein wesentlicher Faktor bei der Übertragung von an Proben ermittelten Schwingfestigkeitskennwerten auf Bauteile, lässt sich in einen technologischen, spannungsmechanischen, statistischen und oberflächentechnischen Größeneinfluss einteilen, wobei jedoch nicht immer eine vollständige Entkopplung aller Größeneinfluss-Mechanismen möglich ist [209]. Eine ingenieurmäßige Möglichkeit der Berücksichtigung ist durch das höchstbeanspruchte Werkstoffvolumen gegeben, in dem der spannungsmechanische und der statistische Größeneinfluss zusammenwirken. Es wird vom Spannungsgradienten, der Geometrie und auch von der Art der Belastung (zum Beispiel Planbiegung oder Umlaufbiegung, Axialbelastung, Torsion) bestimmt und beeinflusst somit die Versagenswahrscheinlichkeit entscheidend. Der sogenannte technologische und oberflächentechnische Größeneinfluss ist durch gesonderte Betrachtung von Oberflächen-, Randschicht- und Gefügezustand zu berücksichtigen.

Da Versagen auslösende Werkstoffgrenzen sich nicht nur auf die Oberfläche beschränken, sondern sich auch im oberflächennahen Bereich befinden können, hat es sich als brauchbar erwiesen, jenes Volumen, in dem die maximale örtliche Beanspruchung um 10 % abfällt (in dem also mindestens 90 % der maximalen örtlichen Beanspruchungen herrschen), als das höchstbeanspruchte Werkstoffvolumen $V_{90\%}$ zu definieren und zur Bewertung heranzuziehen. Je größer das höchstbeanspruchte Volumen ist, umso größer ist die Wahrscheinlichkeit, dass ein Werkstofffehler anrissinitierend wirkt. Aus diesem Grunde werden örtlich ertragbare Spannungen von größeren höchstbeanspruchten Werkstoffvolumina geringer. Bei der Übertragbarkeit wird

zunächst vorausgesetzt, dass Werkstoff, Oberflächen- und Randschichtzustand einschließlich eventuell vorhandener Eigenspannungszustände von Probe und Bauteil gleich sind. Das heißt, der technologische und oberflächentechnische Größeneinfluss wird berücksichtigt. Die Berücksichtigung des höchstbeanspruchten Werkstoffvolumens ist für dickwandigen EN-GJS-400-15 in [206] beschrieben.

8.7.3 Bauteilbemessung

Bei der Gestaltung eines Gussteils lassen sich mehrere Aspekte gleichzeitig realisieren. Durch das Urformverfahren kann der Konstrukteur ein Gussteil entsprechend den Anforderungen aus Belastung und Geometrie zunächst frei gestalten, wobei hoch beanspruchte Bauteilbereiche immer ein einwandfreies Gefüge aufweisen müssen. Die optimale Gestaltung eines Gussteils erfordert daher bereits in der Entwurfsphase die enge Zusammenarbeit von Konstruktion, Berechnung (numerische Simulation) und Gießerei, damit Gestaltung, Belastung und Gießbarkeit sich nicht widersprechen, sondern ergänzen.

8.7.3.1 Regelwerke und Normen

Stellvertretend sei hier die FKM-Richtlinie genannt [26], die allgemein für Maschinenbauteile gilt und somit umfassend einen großen Bereich abdeckt. Sie ermöglicht einen Betriebsfestigkeitsnachweis für Bauteile des Maschinenbaus unter Beachtung aller wesentlichen Einflussgrößen. Sie ist ein umfassendes Regelwerk, das in Deutschland und anderen europäischen Ländern anerkannt wird. Es existieren Software-Programme, die die Handhabung beim Nachweis erheblich erleichtern.

Um einer Vielzahl von Anwendungsfällen Rechnung zu tragen, müssen Regelwerke

und Normen allgemein formuliert sein. Dies kann zur Überdimensionierung führen, da Bauteileigenschaften bei einer Bemessung nicht zufriedenstellend ausgereizt werden können.

8.7.3.2 Eingangsgrößen für die Bemessung

Beim Bemessen und Gestalten von gegossenen Komponenten müssen die Funktionalität und das betriebssichere Verhalten möglichst bei minimalem Werkstoffvolumen gewährleistet sein. Die besten Beispiele liefert hierzu die Natur. Doch lassen sich bei der Gestaltung nicht immer (bei Gussteilen aber häufig) die Prinzipien eines „Bio-Designs“ auf eine Konstruktion übertragen, da geometrische Zwänge oft keinen Freiraum zur Gestaltung lassen. Für die Bemessung müssen als Eingangsgrößen viele Randbedingungen bekannt sein, wie zum Beispiel

- Belastungen (Kräfte, Momente, Drücke usw.) oder Beanspruchung (Spannungen oder Dehnungen, einschließlich Medien und Temperatur) in Höhe und Häufigkeit (Lastkollektiv) und deren Eintrittswahrscheinlichkeit;
- Beanspruchbarkeit in Form von Lebensdauerlinien;
- Bemessungslebensdauer und Ausfallwahrscheinlichkeit.

Hierbei sind die kundenspezifischen Beanspruchungsprofile von besonderer Bedeutung. Diese lassen sich am zutreffendsten durch Messungen ermitteln, welche noch unter Berücksichtigung nicht gemessener, physikalischer Randbedingungen aufbereitet werden können. Der Betriebsfestigkeitsnachweis gestaltet sich vielfältig, und reicht vom Nachweisversuch am Bauteil (Bild 174) bis hin zum rein rechnerischen Nachweis [26].

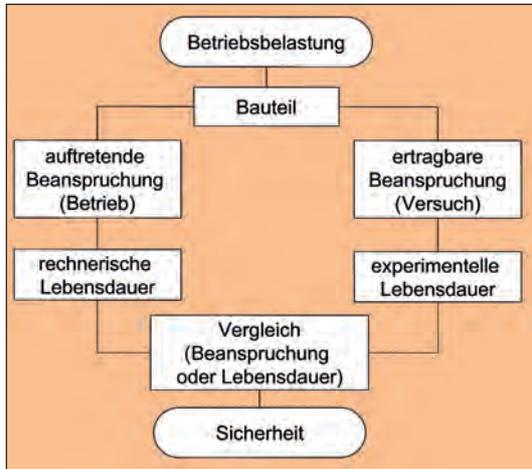


Bild 174: Bauteilbemessung

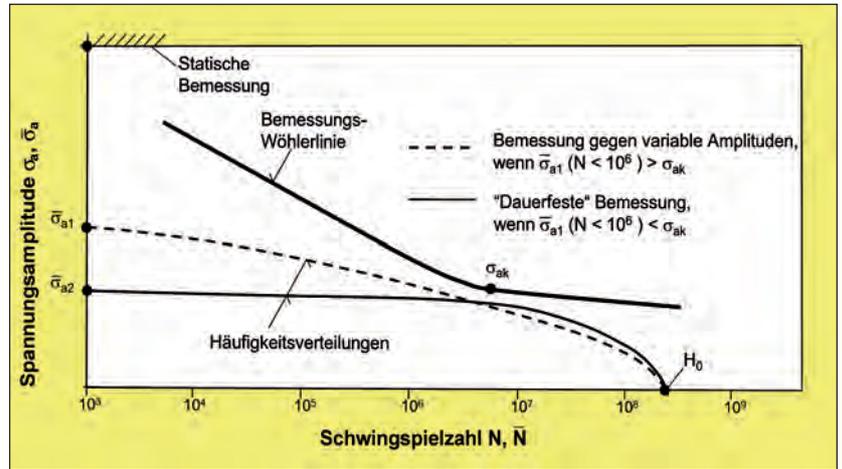


Bild 175: Bemessungskriterien

8.7.3.3 Bemessungskonzepte

Die Kriterien für eine zutreffende betriebsfeste Bauteilbemessung sind die Zuverlässigkeit der Komponenten einer Konstruktion oder des ganzen Systems (Funktionstüchtigkeit) und die Sicherheit (kein Ausfall vor Erreichen der Bemessungslebensdauer für eine geforderte rechnerische Ausfallwahrscheinlichkeit). Folgende Bemessungskriterien werden in der Technik angewendet (Bild 175):

- Statische Bemessung (in der Regel gegen die Werkstoff-Dehngrenze);
- „Dauerfeste“ (sogenannte) Bemessung, wenn das Kollektiv unterhalb des Wöhlerlinienverlaufes nach dem Abknickpunkt liegt, aber der Kollektivhöchstwert weitaus mehr als 10^6 mal auftritt (Dies ist zum Beispiel bei Pleueln, Kurbelwellen und Zahnrädern der Fall). Obwohl die Belastungen mit variablen Amplituden auftreten, werden sie wegen der hohen Häufigkeit des Kollektivhöchstwertes wie eine Belastung mit konstanten Amplituden behandelt;
- „Betriebsfeste“ (sogenannte) Bemessung, wenn eine Überschreitung des Wöhlerlinienverlaufes nach dem Abknickpunkt durch den Kollektivhöchstwert sowie durch eine begrenzte Anzahl von variablen Amplituden erlaubt wird. Die Zulassung höherer Beanspruchungen als beim Abknickpunkt der Wöhlerlinie führt zu kleineren Bauteilquerschnitten (Leichtbau!).

Die folgenden Konzepte werden in den verschiedenen Sparten der Technik, manchmal gleichzeitig, angewendet.

1. Nennspannungskonzept - Das Nennspannungskonzept setzt die Definition sowohl einer Nennspannung als auch die Zuordnung einer Formzahl beziehungsweise bei Schweißverbindungen einer Kerbfallklasse (Kerbdetail) voraus. Nach der Definition dieser beiden Größen muss

eine Bemessungswöhlerlinie im Nennspannungssystem für die gleiche Kerbzahl oder Kerbfallklasse des zu bewertenden Bauteils herangezogen werden. Dieses Konzept, das auch mit Nenndehnungen arbeiten kann, stößt bei komplexen Geometrien, für die weder eine Nennbeanspruchung noch eine Formzahl definiert werden kann, an seine Anwendungsgrenzen. Zudem verdrängen die heutigen Möglichkeiten in der numerischen Simulation, die örtliche Beanspruchungen zur Verfügung stellen, dieses Konzept immer mehr.

2. Strukturspannungskonzept - Das Strukturspannungskonzept wurde für Schweißverbindungen entwickelt. Das Konzept, bei dem auch Dehnungen zugrunde gelegt werden können, extrapoliert die Spannungsverteilung außerhalb der Schweißnaht auf die Nahtübergangskerbe nach festgelegten Kriterien und definiert eine Hot-Spot-Spannung. Diese Spannung wird dann einer Strukturspannungswöhlerlinie zugeordnet und bewertet. Der Vorteil dieses Konzeptes liegt darin, dass bei komplexer Geometrie das Problem der Definition einer Nennspannung, gegebenenfalls auch eines Kerbfalles, umgangen wird. Im Vergleich zum Nennspannungskonzept werden bei Schweißverbindungen sehr wenige Kerbfall-(Detail)klassen angegeben. Der Nachteil liegt darin, dass von außen nicht zugängliche kritische Bereiche, wie beispielsweise Wurzelkerben, mit diesem Konzept nicht mehr beurteilt werden können.

3. Örtliches Konzept - Das Örtliche Konzept (Kerbgrundkonzept) kann sowohl mit Spannungen als auch mit Dehnungen arbeiten. Hierzu müssen die lastbedingten Kerbspannungen- oder -dehnungen ermittelt werden und für deren Bewertung die örtlich ertragbaren Beanspruchungen (Beanspruchbarkeit), das heißt Lebensdauerlinien im örtlichen System, unter Berücksichtigung des Größeneinflusses,

Oberflächen- und Randschichtzustandes, vorliegen. Der Vorteil dieses auch für Schweißverbindungen anwendbaren Konzeptes liegt darin, dass die für das Versagen verantwortlichen lokalen Beanspruchungsgrößen auch für schwierigste Geometrien numerisch ermittelt werden können.

4. Bruchmechanikkonzept - Das Bruchmechanikkonzept geht von der Vorstellung aus, dass in kritischen Bereichen eines Bauteils rissartige Fehler oder Geometrien vorliegen, von denen aus ein Riss eingeleitet werden und fortschreiten kann. Die Risseinleitung kann durch die Definition einer Spannungsintensität, der Rissfortschritt durch zusätzliche Werkstoffgesetze linear-elastisch oder elastoplastisch behandelt werden. Findet die Entstehung eines technischen Anrisses bis zu einer definierten Länge oder Tiefe keine Berücksichtigung, wird bei dieser Bemessungsmethode diese Lebensdauerphase nicht genutzt. Zu dieser Thematik ist bereits ausführlich in Kapitel 8.6 berichtet worden.

5. Versagensthypothesen - Die Beanspruchungen in kritischen Bereichen von Bauteilen sind in der Regel mehrachsig. Sie können nur dann bewertet werden, wenn sie mittels einer geeigneten Festigkeitshypothese in eine Vergleichsspannung umgewandelt werden. Für Eisen-gusswerkstoffe kann die Schnittebenen bezogene Normalspannungshypothese (NH) sowohl für Beanspruchungen mit konstanten als auch zeitlich veränderlichen Hauptspannungsrichtungen angewendet werden [210 - 212].

6. Lebensdauerabschätzung - Die Frage nach der Lebensdauerabschätzung stellt sich bei zeitlich veränderlichen Beanspruchungen. Zur rechnerischen Abschätzung der Lebensdauer nach der Hypothese der linearen Schadensakkumulation nach Palmgren (1924) – Miner

(1945) (**Bild 176**) ist die Kenntnis des Kollektives (Rainflow-Matrix oder Überschreitungshäufigkeit von Klassengrenzen in Kombination mit der Bereichspaarzählung) und auch der Wöhlerlinie erforderlich. Da die Amplituden des Kollektivs in aller Regel unterschiedliche R-Werte aufweisen, wird häufig eine Transformation auf den R-Wert der Wöhlerlinie vorgenommen. Bei der Original-Palmgren-Miner-Rechnung verläuft die Wöhlerlinie nach dem Abknickpunkt waagrecht. Das heißt, es wird nicht berücksichtigt, dass Amplituden unterhalb des Abknickpunktes schädigen. Aus diesem Grund wird die Wöhlerlinie, je nach Modifikation der Palmgren-Miner-Regel, nach dem Abknickpunkt mit einer veränderten Neigung fortgesetzt, zum Beispiel mit $k'=k$ (Palmgren-Miner-Elementar) oder mit $k'=2k-m$ (Modifikation nach Haibach mit $m=2$ für Gusswerkstoffe), um auch der Schädigung durch kleine Amplituden unterhalb des Abknickpunktes Rechnung zu tragen. Die meist angewandten Modifikationen sind die vorstehend genannten. Nach der Summation der Teilschädigungen n_i/N_i kann die Lebensdauer \bar{N}_{rech} mit der theoretischen Schadenssumme $D_{th}=1,0$ berechnet (abgeschätzt) werden. Für eine zutreffende Abschätzung ist die Kenntnis der tatsächlichen Schadenssumme D_{tat} erforderlich, die in der Regel kleiner als 1,0 ist. Sie lässt sich nur aus Experimenten (Wöhler- und Gaßnerlinie) als Verhältnis zwischen der experimentell ermittelten Lebensdauer und der mit $D_{th}=1,0$ berechneten bestimmen (**Bild 176**), und ist mit dem Berechnungsverfahren und Kollektiv verknüpft. Falls im Betrieb andere Kollektivformen vorliegen als die im Versuch verwendeten, kann in diesem Fall die Lage der entsprechenden Gaßnerlinie durch eine relative Schädigungsberechnung abgeschätzt, jedoch seltenst zutreffend berechnet werden. Die tatsächlichen Schadenssummen können über drei Dekaden streuen. Etwa 90 % der aus Experimenten abgeleiteten Schadenssummen liegen unter dem theoretischen Wert $D_{th}=1,0$. Das heißt, Berechnungen mit $D_{th}=1,0$ liefern in den meisten Fällen eine Überschätzung der Lebensdauer. Aus diesem Grunde wird bei einer Vorbemessung zur Abschätzung der Lebensdauer für Schweißverbindungen die zulässige Schadenssumme $D_{zul}=0,5$ und für nicht geschweißte Bauteile $D_{zul}=0,3$ (FKM-Richtlinie) angenommen. Für Beanspruchungszeit-Abläufe mit hohen Mittelwertschwankungen sollte anstatt 0,5 der Wert 0,2 und anstatt 0,3 der Wert 0,1 verwendet werden. Aufgrund dieser Unsicherheiten ist ein experimenteller Festigkeitsnachweis, sofern dies möglich ist, insbesondere für Sicherheitsbauteile stets zu empfehlen.

8.7.4 Ertragbare Beanspruchungen

8.7.4.1 Bruchverhalten unter Schlagbelastung

Bei einer betriebsfesten Auslegung müssen Bauteile auch nach Entstehen eines unvorhergesehenen Anrisses einer Missbrauchsbelastung wie einem Schlag durch eine entsprechende Festigkeitsreserve standhalten. Solche Belastungen können zum Beispiel an Fahrwerkskomponenten bei einer Fahrt über ein Hindernis, durch ein Schlagloch oder bei einem Aufprall gegen eine Bordsteinkante auftreten. Ausführlich wurde bereits unter 8.6 auf das Riss- und Bruchverhalten bei statischer, zyklischer und dynamischer Beanspruchung eingegangen.

Im **Bild 177** wurden zwei Nutzfahrzeug-Radnaben gleichen Gewichts aus einem geschmiedeten und einem gegossenen Werkstoff gegenübergestellt, bei denen in den höchst beanspruchten kritischen Bereichen künstliche Anrisse mit einer Tiefe von 0,5 mm im hoch beanspruchten Bereich eingebracht wurden. Bei den konventionellen Werkstoffkennwerten zeigt

sich zwar der Schmiedestahl dem Gusswerkstoff überlegen, jedoch ist aufgrund der gusstechnischen Gestaltung (Rippen in den kritischen Bereichen) im Vergleich zu der geschmiedeten Nabe eine deutlich höhere Schlagkraft erforderlich, um einen Gewaltbruch zu erzeugen. Die Höhe der unter schlagartiger Belastung erforderlichen Bruchkraft wird im Beispiel stark von der Geometrie beeinflusst und erlaubt daher keine Korrelation mit den an Proben ermittelten statischen Werkstoffkennwerten.

8.7.4.2 Formdehngrenze

Die 0,2%-Werkstoffdehngrenze (die Spannung mit einer bleibenden (plastischen) Verformung von $\epsilon_{pl}=0,2\%$) wird mit einem ungekerbten Probestab ($K_t=1,0$) im Zugversuch oder während eines dehnungsgeregelten Versuchs aus der Last-(Spannung)-Dehnungskurve ermittelt. Sobald der linear-elastische Bereich der Spannungs-Dehnungskurve überschritten wird, neigt der Werkstoff unter Lastregelung und axialer Belastung, je nach seinen Verfestigungseigenschaften, wegen nicht vorhandener Stützwirkung (kein Span-

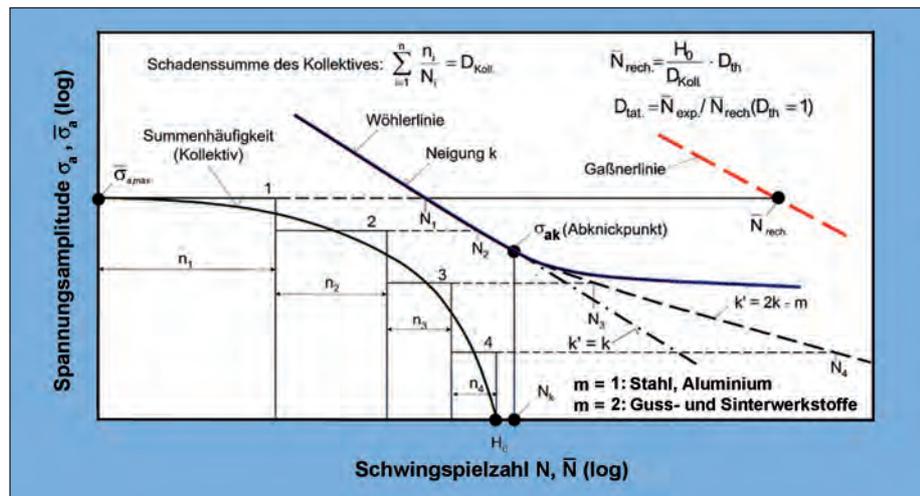


Bild 176: Schematische Darstellung der Berechnung der Bauteillebensdauer

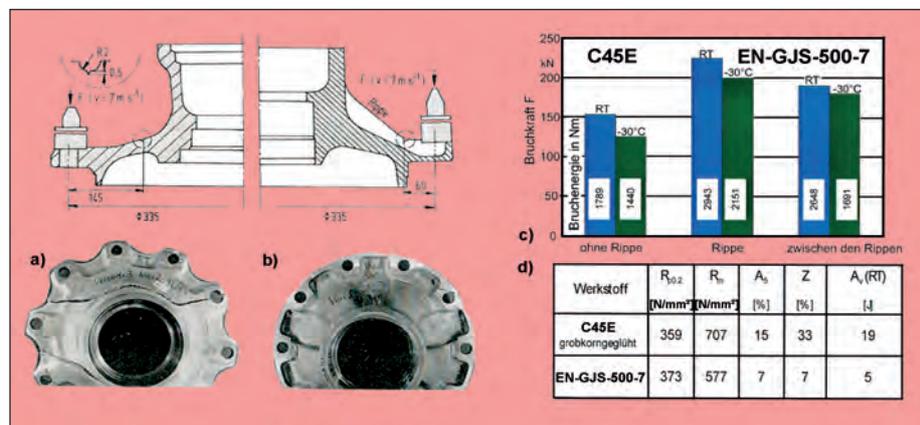


Bild 177: Einfluss der konstruktiven Formgebung auf die erforderliche Bruchkraft von Nutzfahrzeug-Radnaben

a) geschmiedete Nabe aus C45E
c) Bruchkraft

b) gegossene Nabe aus EN-GJS-500-7
d) mechanische Eigenschaften

nungsgradient) zu einem unkontrollierten Fließen. Dies kann bei der ungekerbten Probe nur durch eine Dehnungsregelung (Dehnungswöhlerlinie) unterbunden werden.

Für das Erreichen der 0,2%-Bauteil-Dehnung hingegen sind am Bauteil oder an einem Kerbstab, im Vergleich zur 0,2%-Dehnung der ungekerbten Probe, eine höhere örtliche Gesamtdehnung erforderlich. Dies ist durch die Spannungsgradienten in der Kerbe des Bauteils oder der Kerbprobe bedingt. Das Verhältnis zwischen der örtlichen Gesamtdehnung, die am Bauteil und an der ungekerbten Probe eine bleibende Verformung von 0,2-% ergeben, wird als Stützziffer definiert. Die Spannungsgradienten in der Kerbe verhindern örtlich ein unkontrolliertes Fließen, das heißt, sie üben trotz der äußeren Lastregelung örtlich bis zu einem gewissen Maß eine Dehnungsregelung aus, sofern die 0,2%-Bauteil-Dehnung nicht überschritten wird. Deswegen liegt am Bauteil oder an der Kerbprobe zwischen der äußeren Belastung und örtlichen Dehnung ein größerer linearer Bereich vor als bei der ungekerbten Probe. Die aus der Sicht der Betriebsfestigkeit wichtige Bauteil-Formdehnungsgrenze, die durch eine Betriebsbeanspruchung infolge einer Sonderbelastung angesprochen werden kann, darf die Ermüdungsfestigkeit nicht beeinträchtigen. Sie ist daher, je nach Werkstoff und Konstruktion, kleiner als die 0,2%-Bauteil-Dehnungsgrenze, zum Beispiel 0,02 bis 0,05 %.

8.7.4.3 Auswahl bemessungsrelevanter Kennwerte

Schwingfestigkeitskennwerte werden überwiegend an Proben ermittelt und zur Verfügung gestellt. Die Aussagekraft dieser Kennwerte hängt davon ab, inwieweit der Anwender anhand der zur Verfügung gestellten Daten in der Lage ist, verschiedene Einflussfaktoren zu bewerten. Wei-

terhin ist das Versagenskriterium von Bedeutung. Schwingfestigkeitskennwerte, die an ungekerbten Proben ermittelt wurden, bieten meistens einen konservativen Ansatz, da die Proben unter Axialbelastung keinen Spannungsgradienten aufweisen. Unter Biegebelastung werden, in Abhängigkeit des Spannungsgradienten, in aller Regel höhere Kennwerte ermittelt (**Bild 178**). Es ist daher sehr schwierig, Kennwerte wie im **Bild 167** zur Verfügung zu stellen, da diese immer eine Bemessungsmethodik erfordern (Berücksichtigung lokaler Eigenschaften wie Gefüge, Festigkeit, Randschichtzustand, höchst beanspruchtes Werkstoffvolumen, Oberflächennachbehandlung, usw.), die die zuverlässige Übertragbarkeit der Kennwerte von Proben auf Bauteile ermöglicht.

Sofern keine Erfahrungen bezüglich der Schwingfestigkeitskennwerte vorliegen, empfiehlt sich immer ein Nachweisversuch mit dem realen Bauteil. Sofern dies nicht möglich ist, sollte mit dem Bauteil entnommenen Proben (keine Angussproben) mit vergleichbaren lokalen Eigenschaften eine Lebensdauerlinie abgeleitet werden.

1. Kennwerte zu dickwandigem Guss

Zyklisch beanspruchte, dickwandige Bauteile aus Gusseisen mit Kugelgraphit, wie zum Beispiel Motorblöcke für Großdieselmotoren, Rahmen für Schmiedepressen, Hydraulikzylinder für Kunststoffspritzgießmaschinen, Verdichter- und Turbinengehäuse, Mahlteller usw., werden oftmals nur in geringen Stückzahlen produziert. Aus diesem Grunde ist es unwirtschaftlich, den Gießprozess wie bei Serienbauteilen hinsichtlich Gießverfahren, Einsatzmaterialien, Metallzusammensetzung, Impfung, Anschnitttechnik usw. zu optimieren. Infolgedessen wird das geforderte Grundgefüge nicht immer über den gesamten Querschnitt erreicht und der Abnehmer akzeptiert das Bauteil meistens nicht. Es wird zu Ausschuss er-

klärt, wodurch den Unternehmen hohe Kosten entstehen, sowohl durch die erneute Herstellung als auch durch die arbeitsintensive Verschrottung des Ausschussteils. Daher wurden Schwingfestigkeitskennwerte für Ungängen wie Dross an der Oberfläche, Lunkern im angeschnittenen oder eingebetteten Zustand, Graphitentartungen (zum Beispiel Chunky-Graphit) und verschiedenen anderen Entartungen bereitgestellt, die an großen, teilweise dem Bauteil entnommenen Proben ermittelt wurden (**Bild 180**).

Die Kennwerte für Gefüge ohne und mit Entartungen sind derart aufbereitet, dass sie unmittelbar in die Bemessungspraxis des für dickwandige Bauteile häufig verwendeten Gusswerkstoffes EN-GJS-400-15 einfließen können [30, 206]. Aus den ermittelten Schwingfestigkeitskennwerten wurde der Einfluss der Belastungsarten, Geometrien und Spannungsgradienten eliminiert und die Kennwerte bei einer definierten Schwingspielzahl einem bestimmten höchst beanspruchten Werkstoffvolumen zugeordnet. Die ertragbaren Vergleichs-spannungsamplituden für Wechsel- und Schwellbelastung lassen sich auf andere höchst beanspruchte Werkstoffvolumina, Schwingspielzahlen und auch Spannungsverhältnisse umrechnen. Über eine Sicherheitsbetrachtung können dann die zulässigen Beanspruchungen, die von den metallographischen Gegebenheiten der zu bemessenden Bauteilbereiche abhängen, den auftretenden gegenübergestellt werden. Dadurch ist eine sofortige Entscheidung über die Freigabe eines Bauteils möglich. Die Methodik ist sowohl bei Gießern als auch bei deren Kunden akzeptiert.

2. Kennwerte zu ADI

Bei gekerbten Bauteilbereichen ist eine Erhöhung der Schwingfestigkeit durch die Wahl eines höherfesten Werkstoffes zunächst nicht zu erwarten (**Bild 167**). Bereits relativ alte Untersuchungen zeigen aber,

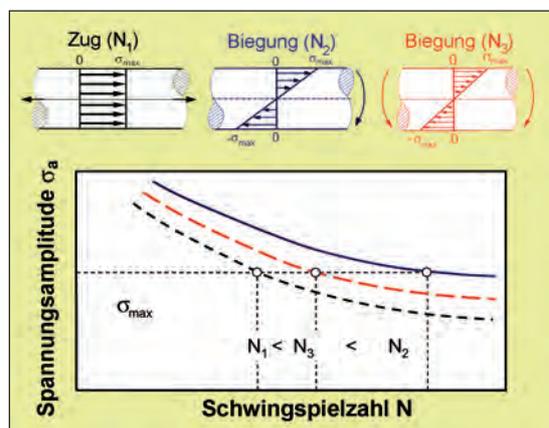


Bild 178: Größeneinfluss und Schwingfestigkeit



Bild 179: Fadenführungstrommeln für den Textilmaschinenbau aus EN-GJS-600-3 in verschiedenen Durchmessern von 96 bis 101 mm, Gewicht 4,5 bis 9 kg (Bild: CLAAS GUSS, Bielefeld)

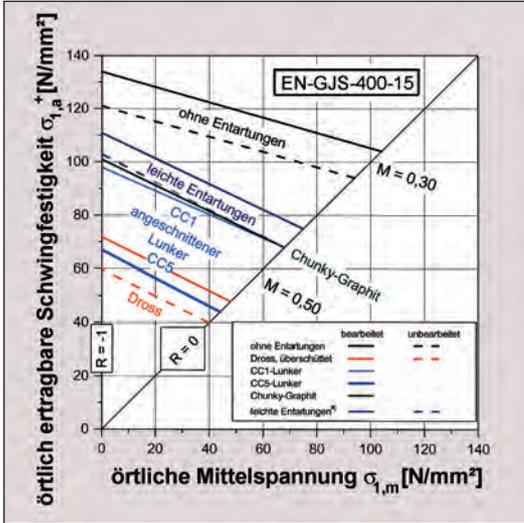


Bild 180: Schwingfestigkeit von dickwandigem EN-GJS-400-15 unter Berücksichtigung des Oberflächen- und Gefügestandes

- *) $N = 2 \cdot 10^6$ Schwingspiele, höchstbeanspruchtes Werkstoffvolumen $HbV = 8000 \text{ mm}^3$, Vertrauenswahrscheinlichkeit $C = 90 \%$, Überlebenswahrscheinlichkeit $P_0 = 50 \%$
- *) Poren, leicht entartetes Gefüge mit Poren, Graphit-Entartungen (Form III), punktueller Dross

dass mit dem Werkstoff ADI (siehe 8.1) durchaus auch bei Kerben eine Erhöhung der Schwingfestigkeit möglich ist, insbesondere wenn variable Amplituden vorliegen (Bild 181). Unter schwelenden variablen Amplituden treten höherfeste perlitische Gusswerkstoffe (Temperguss EN-GJMB-700-2 und Gusseisen mit Kugelgraphit EN-GJS-700-2) und auch ADI bereits schon im nicht Randschicht nachbehandelten Zustand in Konkurrenz zu Schmiedestählen [213] (Bild 182). Neuere Untersuchungen [214, 215] verdeutlichen anhand von dehnungsgegegelten Versuchen an ungekerbten Proben das vorhandene Potential. Bei einem Unterschied in den zyklischen Dehngrenzen von 75 % beträgt die reale Steigerung für ADI gegenüber EN-GJS-400-15 100 % unter konstanten Amplituden und 120 % unter variablen Amplituden (Bild 183).

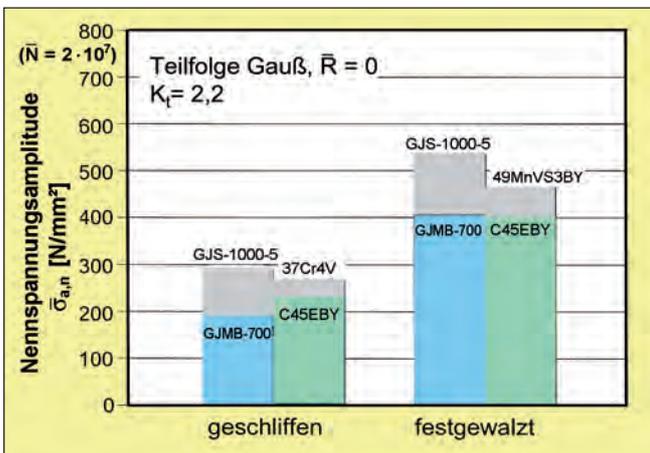


Bild 182: Vergleich von Gusswerkstoffen und Schmiedestahl

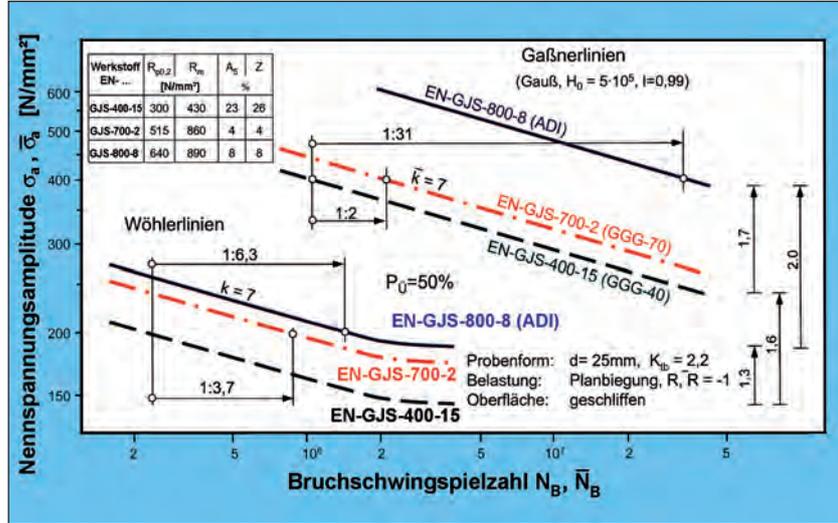


Bild 181: Wöhler- und Gaßner-Linien für Gusswerkstoffe

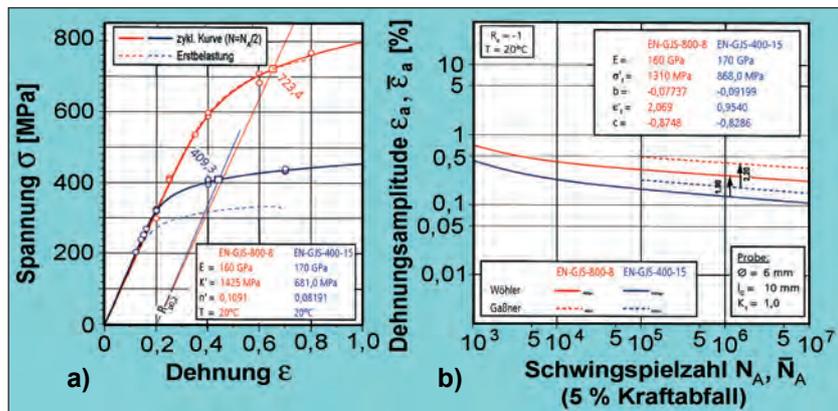


Bild 183: Züge und zyklische Kennwerte von ADI und EN-GJS-400-15
a) Spannungs-Dehnungs-Kurven
b) Dehnungs-Wöhlerlinien und -Gaßnerlinien

Dieses Verhalten wurde auch bei realen Bauteilen (Panhardstäben) mit roher, reinigungsgestrahlter Oberfläche nachgewiesen (Bild 184).

Von diesen Werkstoff mit „austenitisch-ferritischem“ (stabilisierter Austenit mit Ferritnadeln) Gefüge, der durchaus vom SITRAM-Effekt (spannungsinduziert umwandelnder Martensit) profitiert, wurden

bisher kleinere Serien zum Anlaufen gebracht. Für einen Großserieneinsatz ist der Bedarf für diesen Werkstoff von der Industrie noch konkret zu formulieren. Ein erfolgreicher Einsatz ist dann möglich, wenn das Einsatzprofil im Einklang mit dem Produkt steht und Grundlagen für eine Bauteilverbessung und Lebensdauerabschätzung zur Verfügung gestellt werden.

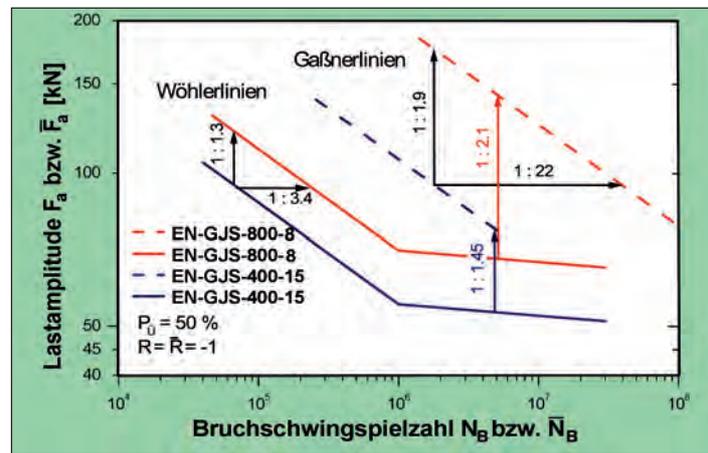


Bild 184: Zyklische Kennwerte von Pahandstäben aus ADI und EN-GJS-400-15

8.7.4.4 Sicherheitsbetrachtung

Für eine Bauteilbemessung wird, ausgehend von einer Lebensdauerlinie mit einer Überlebenswahrscheinlichkeit von $P_0 = 50\%$, eine Bemessungslebensdauerlinie, das heißt die zulässige Schwingfestigkeit, abgeleitet. Hierzu muss, je nach dem Gefährdungspotenzial eines Bauteils, zunächst eine rechnerische (theoretische) Ausfallwahrscheinlichkeit P_A definiert werden: Bei lebenswichtigen Bauteilen, die niemals ausfallen dürfen, wie Bremsen zum Beispiel $P_A \leq 10^{-6}$, bei Bauteilen, die häufig inspiziert und in einem abgesicherten Bereich betrieben werden (zum Beispiel ein Hochdruckbehälter in einem Bunker) $P_A = 10^{-3}$.

Weiterhin müssen bekannt sein:

s_x - Standardabweichung um den Mittelwert ($P_0 = 50\%$) der Beanspruchbarkeit X (X - ertragbare Beanspruchung, wie z. B. Spannung, Dehnung, Kraft, Moment, Druck) mit

$$s_x = \frac{1}{2,56} \cdot \log \frac{1}{T_x}; \quad (8)$$

s_M - Standardabweichung des Mittelwertes der Beanspruchbarkeit (chargen- oder fertigungsbedingte Streuungen des Mittelwertes im Rahmen der Qualitätskontrolle);

s_b - Standardabweichung der Beanspruchung (Belastung) (Falls die maximale Belastung als bekannt vorausgesetzt werden kann, folgt $s_b = 0$).

Unter der Annahme einer logarithmischen Normalverteilung kann aus den einzelnen Standardabweichungen die Gesamt-Standardabweichung

$$s = \sqrt{s_x^2 + s_M^2 + s_b^2}; \quad (9)$$

berechnet werden [216].

Aus der festgelegten rechnerischen Ausfallwahrscheinlichkeit und der Gesamt-Standardabweichung berechnet eine praxistaugliche Näherungslösung [217] den Sicherheitsfaktor

$$j_x = 10^{(2,36 \cdot \sqrt{|\log P_A|} - 1) \cdot s} \quad (10)$$

ausreichend genau. Die zulässige Beanspruchung für die geforderte rechnerische Ausfallwahrscheinlichkeit ergibt sich zu

$$X_{zul} = X(P_0=50\%) / j_x \quad (11)$$

Bei Schwingspielzahl abhängigen Streuungen ergeben sich entlang der Lebensdauerlinie ($P_0 = 50\%$) unterschiedlich große Sicherheitsfaktoren für die Ableitung der Bemessungslebensdauerlinien.

Die Betonung auf 'rechnerisch' ist dadurch begründet, dass der tatsächliche Verlauf einer Verteilung außerhalb des Bereiches $P_0 \approx 5$ bis 95% nicht bekannt ist. Trotzdem ist der Ansatz von rechnerischer Ausfallwahrscheinlichkeit berechtigt, wenn seine Festlegung sich auf nachweisbare Erfahrungen bezüglich eines ausfallfreien Betriebes der Komponenten stützt.

Zur Ableitung von Sicherheitsfaktoren können auch andere Verteilungsformen, zum Beispiel Weibull, verwendet werden. Auch hierfür müssen entsprechende Betriebserfahrungen vorliegen.

8.7.4.5 Nachweisversuche

Grundsätzlich müssen Bauteile so bemessen werden, dass die geforderte Lebensdauer ohne Ausfall erreicht wird. Diese Forderung kann, je nach Relevanz der Bauteile, durch unterschiedliche Qualitäts- und Wirtschaftlichkeitsmaßstäbe erfüllt werden, die von der Einteilung in Primärkomponenten und Sekundärkomponenten nach den Gesichtspunkten der Sicherheit und Funktionsfähigkeit abhängt. Hierbei werden Primärkomponenten in Sicherheits- und Funktionskomponenten unterteilt.

Bei Sicherheitskomponenten, wie zum Beispiel Schwenklager und Räder, muss ein Versagen ausgeschlossen werden, weil dies Lebensgefahr für den Nutzer und die Umgebung bedeutet. Bei solchen Bauteilen werden bei der Bemessung hohe Sicherheitsfaktoren zugrunde gelegt. Bei Funktionskomponenten wird die Vermeidung eines Versagens ebenfalls angestrebt, da die Funktion der Bauteilgruppe unterbunden wird (zum Beispiel Pleuel oder Kurbelwelle). Bei Sekundärkomponenten hingegen, wie Auspuffkrümmer, hat ein Schaden meistens keine direkte Auswirkung auf die Sicherheit und Funktionstüchtigkeit. Demzufolge werden bei Primärkomponenten höhere Qualitätsanforderungen gestellt, auch wegen den

wirtschaftlichen Folgen bei einem Versagen. Zum Beispiel muss bei lebenswichtigen Sicherheitskomponenten die Bemessung alle im Betrieb auftretenden Belastungen nach dem stets neuesten Stand der Technik und der Wissenschaft abdecken. Hierzu sind nicht nur die genaue Erfassung der Betriebsbelastungen erforderlich, sondern auch die Kenntnis der versagenskritischen Bereiche des Bauteils und die örtliche Anstrengung (Verhältnis zwischen der auftretenden und vom Werkstoff oder der Fertigungstechnologie abhängigen zulässigen Vergleichsbeanspruchung). Danach kann die tolerierbare Qualität des Bauteils unter Gesichtspunkten der Wirtschaftlichkeit festgelegt werden.

Qualitätsforderungen, die an die Sicherheit eines Bauteils gekoppelt sind, können nur durch entsprechende Nachweisversuche unter Simulation realer Betriebsbedingungen oder Fahrversuche gewährleistet werden, mit denen die kritischen Bereiche und die Art des Versagens erkannt werden müssen. Ein weiterer Vorteil der Festigkeitsversuche liegt darin, dass durch sie die Konstanz der Fertigungsqualität unter Anwendung statistischer Methoden ständig überprüft werden kann, wie dies beispielsweise in der Pleuel- oder Kurbelwellenherstellung der Fall ist. Der Festigkeitsnachweis muss durch entsprechende Qualitätsvorschriften in der Konstruktion, Materialbeschaffung und Fertigung gestützt werden. Messungen von Betriebsbeanspruchungen zur Verifizierung und gegebenenfalls rechtzeitigen Korrektur der Berechnungen sollten soweit wie möglich vorgesehen werden. Zur Verkürzung der Versuchszeiten kann, unter Berücksichtigung der jeweiligen Amplitudenmittelwerte, eine Omission (Weglassen kleiner Schwingspiele, die nicht zur Schädigung beitragen) durchgeführt werden. Bei mehrachsigen Versuchen ist die Interaktion der einzelnen Zeitsignale zu berücksichtigen [218].

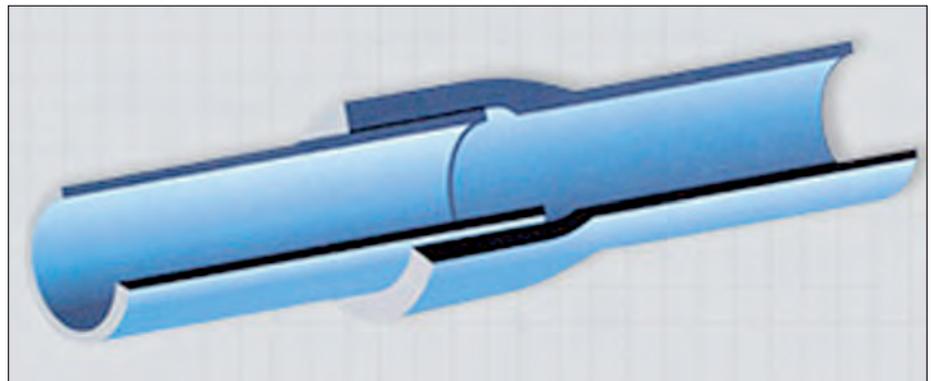


Bild 185: Verpresste und unverpresste Pfähle aus EN-GJS-400-15 des patentierten TRM-Pfahlsystems für Pfahlgründungen. Der duktile Schleuderguss weist mit 420 N/mm^2 Zug- und etwa 900 N/mm^2 Druckfestigkeit, 230 Härteinheiten HB und 15 bis 20% Dehnung die Festigkeitseigenschaften auf, um in weichen und festen Untergründen eingerammt zu werden. (Bild: Tiroler Röhren- und Metallwerke AG, Hall (A), Buderus Guss, Wetzlar)

9 Spanende Bearbeitung

9.1 Allgemeines

Die spanende Bearbeitung von Bauteilen ist ein maßgeblicher Kostenfaktor. Die Optimierung von Werkzeug- und Schnittdaten ist im Hinblick auf eine wirtschaftliche Fertigung von Bedeutung. Dieses beinhaltet nicht nur kurze Stückzeiten, sondern auch eine möglichst hohe Automatisierung des Produktionsablaufes mit geringer Überwachung.

Die Beurteilung der Zerspanbarkeit eines Werkstoffes erfolgt üblicherweise nach den Gesichtspunkten

- abzuspannendes Werkstoffvolumen (Materialzugabe für die Bearbeitung),
- Standzeit und Werkzeugverschleiß,
- Spanbildung,
- Schnittkraft,
- Oberflächengüte und Maßhaltigkeit.

Die beiden ersten Kriterien beeinflussen die Bearbeitungskosten direkt durch ihre Auswirkungen auf die Fertigungszeit (Anzahl Schnitte und Operationen, Spanvolumen pro Zeit aus Schnitttiefe, Vorschub und wirtschaftlicher Schnittgeschwindigkeit). Die Spanbildung ist ein wesentlicher Faktor für die Automatisierungsfreundlichkeit des Fertigungsprozesses. Diesem Kriterium versuchen heute unzählige Spanleitstufengeometrien für die Stahlbearbeitung gerecht zu werden. Für Gusseisen mit Kugelgraphit ist dies nicht erforderlich, da die in die Eisenmatrix ein-

gebetteten Graphiteinschlüsse zu einem kurzbrüchigen Span führen. Die Graphiteinschlüsse sind auch der Grund für die niedrigeren Schnittkräfte bei der Bearbeitung von Gusseisen mit Kugelgraphit (**Tabelle 18**). Sie können als günstige Randbedingung im Zerspanungsprozess betrachtet werden, die zu geringerer Werkstück-, Werkzeug- und Maschinenbelastung führen, ein günstigeres Schwingungsverhalten aufweisen und niedrigere Antriebsleistungen erfordern. Als Oberflächenrauheit werden beim Feindreihen, Feinfräsen oder Reiben Werte bis knapp unter $R_a = 1 \mu m$ erzielt, die für Festsitze vollkommen ausreichend sind. Noch bessere Werte können durch Schleifen, Honen, Läppen oder Glatwalzen erreicht werden.

Insgesamt betrachtet ist Gusseisen mit Kugelgraphit gut und unproblematisch zerspanbar. Wenig Schwierigkeiten mit der Späneabfuhr und geringe Empfindlichkeit bei unterbrochenen Schnitten (niedrigere Schnittkräfte und bessere Dämpfung) selbst beim Anschnitt in die Gushaut sind kennzeichnende Merkmale dieser Werkstoffgruppe. Verglichen mit Stählen gleicher Härte oder ähnlicher Festigkeit liegen bei Gusseisen mit Kugelgraphit die anwendbaren Schnittgeschwindigkeiten, vor allem beim Schlichten mit Hartmetall, etwas tiefer. Mit höheren Vorschüben und optimierter Werkzeugauslegung oder beim Schruppdrehen mit Mehrfach-Werkzeug-Bestückung beziehungsweise weniger Schnitten dank geringerer Materialzugabe kann dieser Nachteil sehr oft ausgeglichen werden.



Bild 186: Aus vier Teilen bestehende Laminierform für eine Satellitenantenne aus EN-GJS-400-15, Gesamtgewicht 17,1 t (Bild: ZGV, Düsseldorf)

Tabelle 18: Spezifische Schnittkräfte beim Drehen von Gusseisen mit Kugelgraphit (Kühlschmiermittel) im Vergleich zu Gusseisen mit Lamellengraphit und Stahl (ohne Kühlschmiermittel) [219]

Werkstoff Kurzzeichen EN-...	Härte HB 5/750 ¹	Schneidstoff	Schneiden-Geometrie ²						Schnittgeschwindigkeit v_c [m/min]	Spezifische Schnittkräfte ³			Spezifische Hauptschnittkraft k_c bei Spannungsdicke h_f [mm] = f [mm/U], $\phi = 90^\circ$ [N/mm ²]							
			α	γ	λ	κ	r	$K_{c(1)}$		$K_{c(1)}$	$k_{p(1)}$	0,10	0,16	0,20	0,25	0,32	0,40	0,50	0,63	0,80
GJS-400-15	161	HM M10	6	-6	-4	70	1,2	250	1020	330	380	2063	1787	1669	1559	1453	1350	1261	1175	1092
GJS-600-3	242	HM M10	6	-6	-4	70	1,2	150	1180	380	460	2367	2067	1931	1803	1680	1562	1459	1359	1263
GJL-250	233	HM K10	6	-6	-4	70	1,2	75	1250	330	510	2420	2115	1984	1860	1741	1626	1525	1427	1333
C35E	155	HM P10	5	6	0	70	0,8	170	1450	310	250	2368	2142	2043	1948	1855	1763	1681	1600	1521
C45E	186	HM P10	5	6	0	70	0,8	112	1680	450	370	10,00	6,25	5,00	4,00	3,10	2,50	2,00	1,60	1,25

¹ Mittlere Messwerte der untersuchten Proben

² Wirkwinkel nach DIN 6581

³ Spezifische Schnittkraft = Schnittkraft für 1 mm² Spanungsquerschnitt

⁴ k_c = Hauptschnittkraft, k_v = in Vorschubrichtung wirkende Schnittkraft,

k_p = Passivkraft; Index 1,1 = Kraft für $a \cdot h_f = 1,0 \cdot 1,0$ mm²

⁵ Bei diesen Schnitttiefen gelten die eingetragenen Werte direkt als Hauptschnittkraft in N



Bild 187: Ein Castor-Behältergussteil aus duktilem GJS bei der Drehbearbeitung (Bild: Siempelkamp, Krefeld)



Bild 188: Im Kokillenguss hergestellter Rotor für einen Verdichter aus EN-GJS-400-15, Dmr. 400 mm, 1350 mm lang (Bild: Bosch-Rexroth, Lohr)

9.2 Drehen

Der bevorzugte Schneidstoff für die Dreh- und Fräsbearbeitung im üblichen (Zahn) Vorschubbereich von 0,15 bis 0,6 mm/U ist Hartmetall in Form von Wendeschneidplatten. Den steigenden Ansprüchen an Verschleißfestigkeit und Stabilität sowie an die Schneidengeometrie begegnen die Hersteller mit der Entwicklung immer besserer Schneidstoffe und optimaler Geometrien für das bestmögliche Zerspansergebnis. Dank der rasanten Entwicklung von Werkzeugen und Maschinen ist die Bearbeitung heute dreimal schneller als noch vor 25 Jahren (**Bilder 187 und 188**).

Zum Drehen haben sich beschichtete Hartmetalle HC-K25 und HC-K30 von der Schrupp- bis hin zur Feinschlichtbearbeitung durchgesetzt. Die Beschichtung erfolgt mit TiC, TiCN oder Al₂O₃. Auf modernen Hartmetall-Wendeschneidplatten werden diese Schichtwerkstoffe zu Mehrlagenbeschichtungen kombiniert. Je nach Schneidengeometrie und Maschinenleistung sind Schnitttiefen bis etwa 10 mm möglich. Die Schnittgeschwindigkeiten bewegen sich im Bereich von 200 bis 600 m/min, wobei die Obergrenze eher für ferritische Werkstoffe mit geringer Härte erreicht wird, während die festen perlitischen GJS-Sorten sowie Werkstücke mit hoher Oberflächenhärte mit geringeren Schnittwerten zu bearbeiten sind (**Bild 189**).

Schneidplatten aus Oxidkeramik konnten sich beim Drehen von Gusseisen mit Kugelgraphit nicht wie bei manchen Bauteilen aus Gusseisen mit Lamellengraphit, auf breiter Basis durchsetzen. Ebenso zeigen unbeschichtete Schneidkeramiken aus Siliciumnitrid ihre Hauptvorteile bei Gusseisen mit Lamellengraphit, nämlich

die relative Unempfindlichkeit gegenüber thermischer Wechselbelastung und mechanischer Schlagbeanspruchung. Bei der Bearbeitung von Gusseisen mit Kugelgraphit im nicht unterbrochenen Schnitt treten jedoch wesentlich höhere Temperaturen an der Schneide auf. Erst die mit TiN, TiCN oder Al₂O₃ beschichtete Siliciumnitrid-Keramik weist einen ausreichenden Temperatur- und Verschleißwiderstand und damit die geforderte Standzeit auf. Aufgrund von Gratbildung wird sie meist nur zur Schruppbearbeitung von ferritischem Gusseisen mit Kugelgraphit bei Schnittgeschwindigkeiten von 200 bis 1500 m/min eingesetzt.

Zum Schlichten von perlitischem oder gehärtetem Gusseisen mit Kugelgraphit kommen CBN-Schneidplatten BH-K20 und BH-K25 bei Schnittgeschwindigkeiten von 200 bis 800 m/min (in Einzelfällen auch bis 1 500 m/min) und Schnitttiefen bis etwa 4 mm zum Einsatz. Aufgrund der hohen Härte und Bruchzähigkeit ist CBN für das Hartfeindrehen im unterbrochenen Schnitt prädestiniert. Beim Hartfeindrehen mit nicht unterbrochenen Schnitten und gleichmäßigem Aufmaß wird die empfindlichere Mischkeramik aus Titancarbonitrid und Al₂O₃ verwendet. Sie kann bei deutlich geringeren Kosten pro Schneide im gleichen Schnittgeschwindigkeits- und

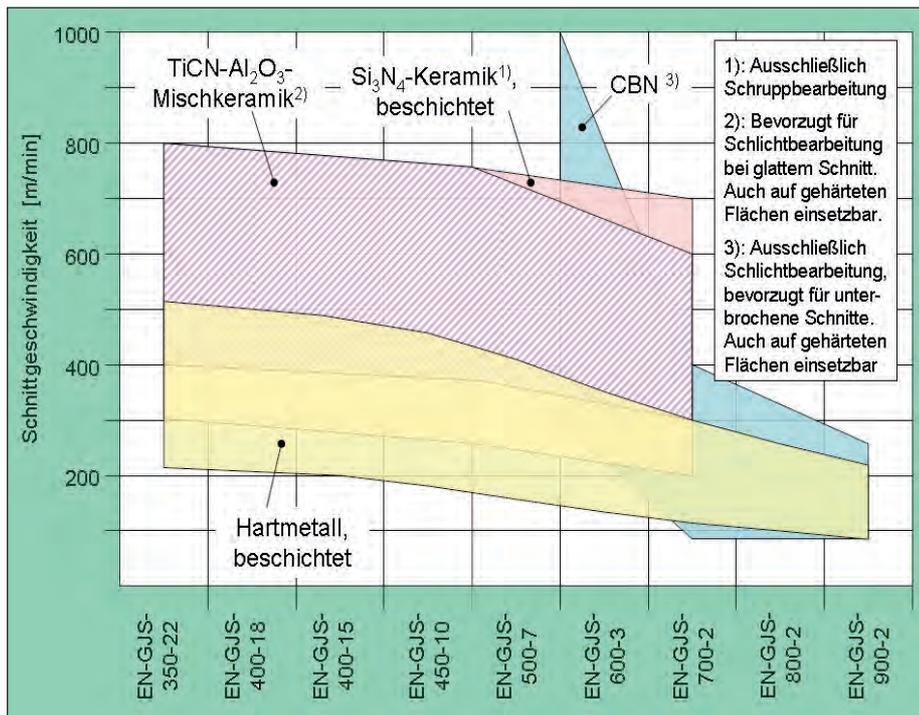


Bild 189: Schneidwerkstoffe für die Drehbearbeitung von Teilen aus Gusseisen mit Kugelgraphit

Vorschubbereich eingesetzt werden wie CBN.

Um das große Potential hinsichtlich der Schnittbedingungen bei Keramik- und CBN-Werkstoffen zu nutzen, müssen hohe Spindelleistungen, -drehzahlen und -vorschübe, eine hohe Maschinensteifigkeit sowie ein geringes Lagerspiel ebenso vorausgesetzt werden wie ein geschlossener Arbeitsraum mit einer schnellen Späneabfuhr.

Graphithaltige Eisengusswerkstoffe benötigen keine Kühlschmierung. Wird eine Kühlschmieremulsion zum Werkstückkühlen sowie Wegschwemmen von Spänen und Gussstaub eingesetzt, so kann dies bei modernen Schneidwerkstoffen aufgrund der permanenten Thermoschockbelastung der Schneide beim Drehen mit unterbrochenem Schnitt sowie beim Fräsen zu einer deutlichen Verringerung der Werkzeugstandzeit führen [220]. Gegenüber der reinen Trockenbearbeitung lassen sich Standzeit, Schnittgeschwindigkeit und Oberflächenqualität durch Minimalmengenschmierung deutlich steigern. Dabei ist eine innere Zufuhr des Aerosols durch die Werkzeugaufnahme und das Werkzeug zu bevorzugen.

Grundsätzlich kann und sollte beim Schrumpfen von Gusseisen mit Kugelgraphit mit hohen Vorschüben gearbeitet werden, sofern es die Stabilität von Werkstück, Werkzeug und Maschine zulässt. Die Richtwerte für Vorschübe und Schnittgeschwindigkeiten hängen stark von der Art der Beschichtung und der Scheidengeometrie ab, so dass auf die Angaben in den Herstellerkatalogen verwiesen werden muss. Der Streubereich der Richtwerte ist weitgehend abhängig von der Werkstoffhärte, wobei eine niedrige Härte die Anwendung der höheren Schnittgeschwindigkeit zulässt. Die Vorschubwerte sind von der Härte nur minimal abhängig. Die Schnitttiefe hat im üblichen Bereich von 1 bis 5 mm keinen Einfluss.

Die Ergebnisse beim Drehen von Rand- und Kernzone sind bei einwandfreien GJS-Gussteilen gleicher Härte und mit sauber gestrahlter Oberfläche innerhalb von $\pm 10\%$ gleich. Die Gusshaut wirkt sich bei Werkstoffen mit geringerer Härte etwas stärker auf das Verschleißverhalten der Werkzeuge aus, da hierbei der Einfluss höherer Schnittgeschwindigkeiten verstärkend wirkt. Andererseits ist zunehmende Werkstückhärte oft mit einer leichten Randentkohlung verbunden, welche die Randschichthärte verringert, wodurch die Standzeit etwas erhöht wird.

Da in einer reibungslosen Fertigung mit geringer Überwachung feste Werkzeugwechselintervalle eingeplant sind, müssen unvorhergesehene Schneidenbrüche vermieden werden. Die Tendenz zur Masseinsparung und Formoptimierung zum Beispiel von Bauteilen im Fahrzeugbau führt zu Konstruktionen mit Werkstoffausparungen und damit zu unterbrochenen Schnitten. Eine Untersuchung beim Drehen im unterbrochenen Schnitt bei mehreren Instituten und Firmen hat gezeigt, dass die Werkzeugbruchgrenze vor allem mit höheren Vorschüben und niedrigeren Schnittgeschwindigkeiten ansteigt [228, 221]. Dabei führt die schlagartige Beanspruchung der Werkzeugschneidkante beim Drehen von Stählen früher zum Bruch als bei Gusseisen mit Kugelgraphit.

Im **Bild 190** sind die Grenzvorschübe f_g dargestellt, bei denen verschiedene Hartmetall-Wendeschneidplatten beim Längsdrehen $Z = 3\ 000$ Schläge von 2,5 mm Schnitttiefe aushielten. Die Bruchgrenzen liegen für EN-GJS-400-15 und EN-GJS-700-2 im Grenzvorschubbereich $f_g = 1,25$ bis $0,4$ mm/U, bei dem Stahl C45E (frühere Bezeichnung Ck 45 N und Ck 45 V) dagegen bei $f_g = 0,65$ bis $0,1$ mm/U.

Für den Dauerbetrieb müssen diese Grenzvorschübe um 30 bis 40 % reduziert werden. Optimale Schneidwerkstoffe erlauben beim Drehen im unterbrochenen Schnitt von Gusseisen mit Kugelgraphit im Härtebereich von 150 bis 220 HBW Vorschübe von $f = 0,8$ bis $0,4$ mm/U, also kaum oder nur unwesentlich niedriger (maximal 25 %) als beim Drehen im glatten, kontinuierlichen Schnitt. Die Schnittgeschwindigkeit sollte jedoch keinesfalls reduziert werden.

Bei der Stahlbearbeitung im unterbrochenen Schnitt müssen dagegen zunächst die Werkzeuge (Schneidplatte, Schneidstoff) und Schnittdaten optimiert werden, um einigermaßen günstige Vorschübe erreichen zu können. Daher wird beim Drehen von Gusseisen mit Kugelgraphit höherer Härte der Nachteil niedrigerer Schnittgeschwindigkeit gegenüber Stahl durch wesentlich höhere anwendbare Vorschübe beim unterbrochenen Drehen mehr als ausgeglichen.

Zudem liegt die Bruchgrenze in einem viel engeren Vorschub-Streubereich, ist also genauer definiert. Somit sind in der Praxis beim Drehen von Gusseisen mit Kugelgraphit im unterbrochenen Schnitt keine Schwierigkeiten zu erwarten, sofern ein Minimum an Stabilität von Werkstück, Werkzeug und Maschine gewährleistet ist.

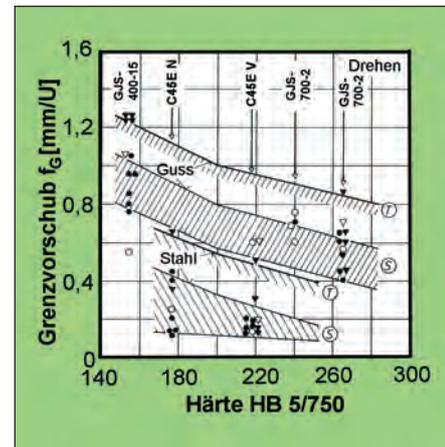


Bild 190: Grenzvorschübe für das Längsdrehen von GJS im unterbrochenen Schnitt im Vergleich zum C45E (nach [222])

$Z_T = 3000$ Schläge ohne Schneidenbruch

Werkzeuge:

S - Standardtestplatte (positiv) SPUN 120 308, Halter CSBPR 2525

T - Dreikantplatte (negativ) TNUN 160 408, Halter CTGNR 2525

Schneidstoff:

- ▽○ - unbeschichtetes Hartmetall
- - unbeschichtete HM-WSP, Vierkantplatte SPUN, $\gamma = +6^\circ$, $\lambda = 0^\circ$, $\kappa = 75^\circ$
- ▼ - beschichtete HM-WSP, Dreikantplatte TNUN, $\gamma = -6^\circ$, $\lambda = -6^\circ$, $\kappa = 90^\circ$

Schnitttiefe $a_p = 2,5$ mm, Schnittgeschwindigkeit $v_c = 100$ m/min für EN-GJS-700-2, alle anderen Werkstoffe $v_c = 160$ m/min, keine Kühlung

9.3 Bohren

Noch wichtiger als beim Drehen ist beim Bohren der kurze Spanbruch von Gusseisen mit Kugelgraphit, wodurch auch bei tiefen Bohrungen geringen Durchmessers die einwandfreie Späneabfuhr gewährleistet ist. Ferner wirken sich hier stärker als beim Drehen die Arbeitsbedingungen wie Vorschub, Bohrverhältnis l/d , Sack- oder Durchgangsloch, Kühlschmierung, Bohrkadenz (Taktzeit), Bohrertyp und Schneidwerkstoff auf das Bohrergebnis

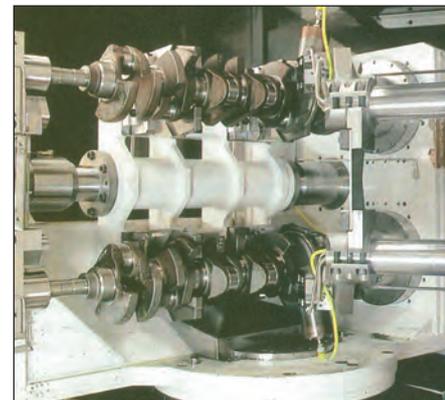


Bild 191: Arbeitsraum einer Tieflochbohrmaschine für das Bearbeiten von zwei Kurbelwellen in einem Arbeitsgang (Bild: Honsberg Lamb, Remscheid)

aus. Beim Bohren von Gusseisen mit Kugelgraphit gibt es praktisch keine Spanablaufprobleme und dank der Graphitschmierung kann mit relativ hohen Vorschüben und Schnittgeschwindigkeiten selbst bei größeren Bohrtiefen gearbeitet werden [223, 224]. Niedrigere Vorschubkräfte und Drehmomente als beim Bohren von Stahl schonen Werkzeug und Maschine (**Bild 191**).

Im **Bild 192** sind Vorschub-Richtwerte für drei verschiedene Bohrer-Schneidwerkstoffe angegeben. Spiralbohrer und Wendelbohrer aus Schnellarbeitsstahl HSS sind die am häufigsten verwendeten Werkzeuge. Vollhartmetallbohrer (VHM), meist beschichtet, sind zwar wesentlich teurer, aber sehr leistungsfähig dank zwei- bis dreifacher Schnittgeschwindigkeit und höheren Vorschüben. Sie können bis 5 x d, in einigen Ausführungen auch bis 10 x d eingesetzt werden und sind häufig mit integrierten Kanälen für eine effektive Kühlmittelzuführung versehen. Kurzbohrer mit Hartmetall-Wendeschneidplatten (HM-WSP) können bei Gusswerkstoffen nur für Bohrtiefen bis 3 x d, vereinzelt bis 5 x d, eingesetzt werden. Beschichtete Wendeschneidplatten erlauben hohe Schnittgeschwindigkeiten bis zum Fünffachen der von HSS bei etwa auf die Hälfte reduzierten Vorschüben. Trotz des teureren Werkzeugs kann dank preiswerter Wendeschneidplatten unter der Voraussetzung wirtschaftlich gebohrt werden, dass kein Bohrerbruch auftritt. Dies ist jedoch bei Gusswerkstoffen äußerst selten der Fall. Voraussetzung dafür sind stabile, leistungsstarke und

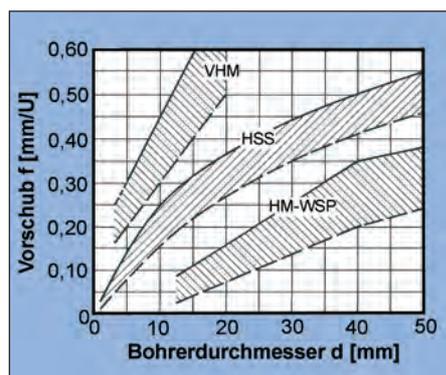


Bild 192: Vorschub-Richtwerte für das Bohren von Gusseisen mit Kugelgraphit in Abhängigkeit vom Bohrerdurchmesser und von der Werkstoffhärte (nach [222, 224])

VHM - Vollmetall-Spiralbohrer, meist TiN-beschichtet, mit speziellen Spitzenanschliffen (zum Beispiel HFS- oder SE-Drill), Bohrtiefen bis 3 · d; d = 3 bis 20 mm)

HSS - Schnellarbeitsstahl-Spiralbohrer, Bohrtiefen bis zu 5 · d

HM-WSP - Kurzbohrer (Vollbohrer) mit Hartmetall-Wendeschneidplatten, Bohrtiefen 3 bis 5 · d = >= 12 mm

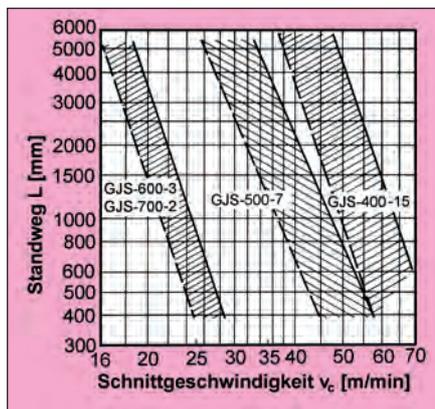


Bild 193: Standweg-Schnittgeschwindigkeits-Vergleich von Spiralbohrern verschiedener Fabrikate beim Bohren von Gusseisen mit Kugelgraphit (nach [223, 224])

Bohrerdurchmesser d = 8 mm, Bohrtiefe L = 40 mm (= 5 · d), Vorschub f = 0,20 mm/U

Sacklochbohrungen, Kernzone, ohne Kühlung, kein Entspannen

Werkstoff EN- ...	Mittlere Härte HB 5/750	Werkzeug-Streuung	
		Standweg L	Schnittgeschwindigkeit v_{L2}
GJS-400-15	167	5,0 : 1	1,29 : 1
GJS-500-7	202	1,2 : 1	1,28 : 1
GJS-700-3	283	2,4 : 1	1,16 : 1

schnelllaufende Bohrmaschinen, Bohreinheiten oder Bearbeitungszentren.

Da bei Massenartikeln wie HSS-Spiralbohrern die Preise stark gedrückt werden, kann es große Qualitätsunterschiede geben. Bei Schneidstoff, Wärmebehandlung und Fertigschliff können Einsparungen oft Leistungseinbußen bewirken, wie im **Bild 193** dargestellt ist. Das Fabrikat B (durchgezogene Linien) erlaubt 3,4- bis 5-fach längere Standwege oder

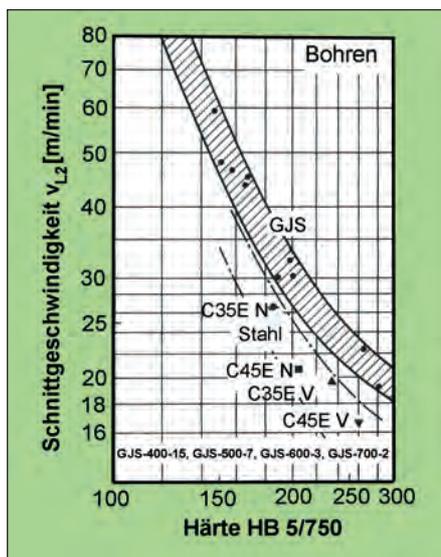


Bild 194: Schnittgeschwindigkeit beim Bohren von GJS im Vergleich zu C45E (Schnittgeschwindigkeitsbereich bei einer Standfläche von 2 m (v_{L2}) in Abhängigkeit von der Werkstoffhärte) (nach [223, 224])

wie bei Beispiel L = 2000 mm 16 bis 29 % höhere Schnittgeschwindigkeiten als das Fabrikat A (unterbrochene Linien).

Im **Bild 194** ist für L = 2000 mm Standweg die Schnittgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Werkstoffhärte angegeben. Das Streuband der Schnittgeschwindigkeit von Gusseisen mit Kugelgraphit im Härtebereich von 130 bis 300 HBW_{5/750} liegt etwas unterhalb desjenigen von schwarzem Temperguss (GJMB), aber über dem vom Kohlenstoffstahl C45E.

9.4 Gewindeschneiden

Innengewinde werden häufig mit HSS-Werkzeugen geschnitten. Mit normalen Maschinen-Gewindebohrern wird bei Gusseisen mit Kugelgraphit bei einer Härte bis 250 HBW mit einer Schnittgeschwindigkeit $v_c = 8$ bis 15 m/min und Kühlschmieremulsion und bei Härten bis 300 HBW mit $v_c = 4$ bis 8 m/min vorzugsweise mit Schneidöl gearbeitet [225]. Für höhere Härten sind entsprechend ausgelegte Gewindebohrer einzusetzen. TiN-beschichtete HSS-Gewindebohrer werden mit Schnittgeschwindigkeiten v_c um 20 m/min betrieben. Maximale Schnittgeschwindigkeiten v_c von 30 bis 100 m/min bieten vorzugsweise mit TiAlN-Beschichtung versehene Hartmetall-Werkzeuge. Selbst bei Trockenbearbeitung liegen die Standzeiten zwei- bis dreimal höher als bei HSS-Werkzeugen. Mit Kühlschmieremulsion lässt sich die Standzeit verdoppeln, mit Minimalmengenschmierung (Hier ist die interne Zuführung durch das Werkzeug zu bevorzugen) sogar noch weiter steigern [226]. Vorteile der internen Minimalmengenschmierung sind zudem eine Unterstützung der Späneabfuhr durch den Luftstrom sowie höhere Oberflächenqualitäten durch die Reibungsminimierung im Schneidenumfeld.

Für duktile Werkstoffe mit einer Bruchdehnung von mindestens 8 % besteht zudem die Möglichkeit, die Fließfähigkeit des

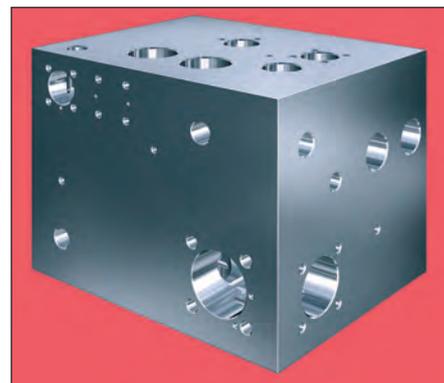


Bild 195: Allseitig vorbearbeiteter Steuerblock für einen hydraulischen Antrieb aus GJS-Killenguss, Gewicht 7,3 t, Abmessungen 1 x 1 x 1 m (Bild: Gontermann-Peipers, Siegen)



Bild 196: Fräsbearbeitung der bisher größten gegossenen Mehretagenpresse mit Plattenteilen 3 785 x 10 515 mm mit je 215 t Rohgussgewicht aus GJS (Bild: Siempelkamp, Krefeld)



Bild 197: Bearbeitung eines gegossenen Querbalkens für eine Großwerkzeugmaschine aus EN-GJS-600-3, Gussgewicht 50 t (Bild: Meuselwitzguss)

Werkstoffes zu nutzen, um so das Gewinde zu furchen. Vorteile sind höhere Gewindefestigkeit und Prozesssicherheit. Dieses Verfahren erfordert allerdings eine gegenüber dem Gewindeschneiden etwa verdoppelte Antriebsleistung sowie das Vorbohren mit größeren und enger tolerierten Werkzeugen.

9.5 Reiben

Auf modernen, flexiblen Werkzeugmaschinen werden selbst genaue Bohrungen vorzugsweise mit nachstellbaren Feinbohrwerkzeugen fertig bearbeitet. Dadurch erübrigt sich das Anschaffen teurer Einzweckreibahnen. Die Schnittgeschwindigkeit beim Reiben beeinflusst die

Fertigungszeit nur wenig, so dass mit den Richtwerten der Werkzeuglieferanten gearbeitet werden kann (Hartmetall: 25 bis 40 m/min, Hartmetall beschichtet: 50 bis 80 m/min, Cermet: 120 bis 200 m/min, Cermet beschichtet: 150 bis 250 m/min).

Die Abstimmung auf die jeweiligen bauteilspezifischen Anforderungen wie Vorschub, Teilung oder Schmiermittel muss fallweise erfolgen.

9.6 Fräsen

Beim Fräsen, naturgemäß ein spangebendes Fertigungsverfahren mit diskontinuierlicher Spanbildung an der Schneide, gelten sinngemäß die Ausführungen für das Drehen mit unterbrochenem

Schnitt. Oxid- und Mischkeramiken haben sich nicht bewährt, wohl aber beschichtete Siliciumnitridkeramiken für die Schruppbearbeitung mit Schnittgeschwindigkeiten von 550 bis 1 000 m/min auf Maschinen mit entsprechender Spindelleistung, -drehzahl und -steifigkeit (**Bilder 196 und 197**).

Im Geschwindigkeitsbereich zwischen 200 und 600 m/min kommen Wendeschneidplatten aus Cermet sowohl für die Schlicht- als auch die Schruppbearbeitung zum Einsatz. Dabei handelt es sich um Verbundwerkstoffe aus keramischen Werkstoffen in einer metallischen Matrix, die sich durch eine besonders hohe Härte und Verschleißfestigkeit auszeichnen. Gegenüber den klassischen Hartmetallen, denen die Cermets entsprechend **DIN ISO 513** zuzuordnen sind, haben sie aufgrund der anderen Zusammensetzung eine höhere Oxidationsbeständigkeit.

Mit Wendeschneidplatten aus beschichtetem Hartmetall lassen sich je nach Anwendungsfall und Geometrie Schnittgeschwindigkeiten zwischen 60 und knapp 400 m/min erreichen. Aufgrund der Ausführungsvielfalt sei hier auch wieder auf die Angaben in den Herstellerkatalogen verwiesen (**Bild 198**).

9.7 Räumen

Mit HSS-Räumnadeln wird je nach Oberflächenanforderung und Werkzeugauslegung mit einer Schnittgeschwindigkeit von $v = 3$ bis 10 m/min gearbeitet. Auch hier sind unter stabilen Arbeitsbedingungen sehr hohe Abtragsraten möglich, zur Werkstückvorbereitung bis über 0,3 mm Schnitttiefe pro Zahn. Wie fast immer bei graphithaltigem Eisenguss kann trocken oder mit Kühlschmieremulsion gearbeitet werden.

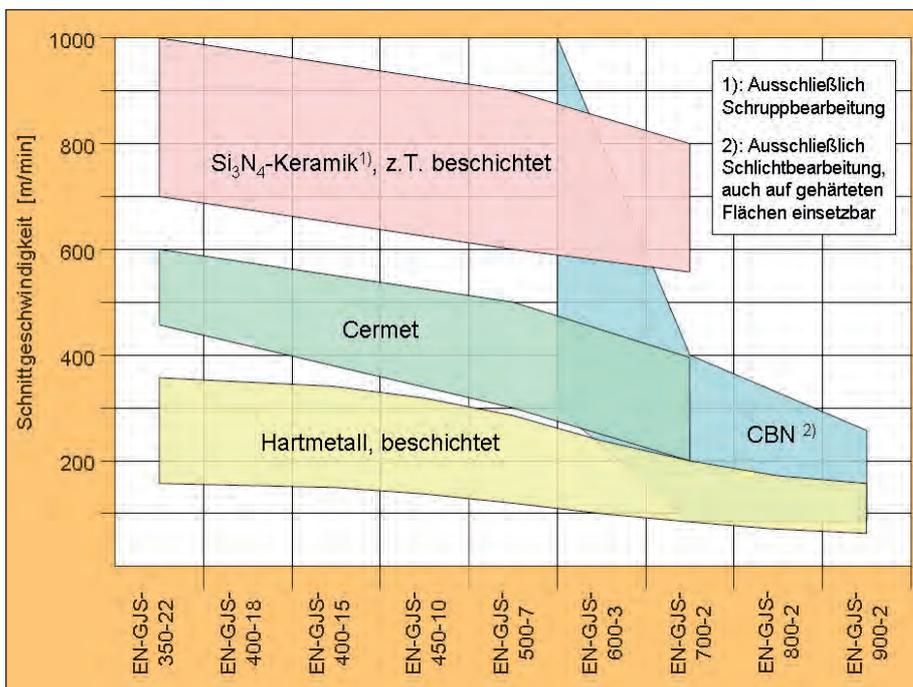


Bild 198: Schneidwerkstoffe für das Fräsen von Teilen aus Gusseisen mit Kugelgraphit



Bild 199: In der Gießerei bearbeiteter Planetenträger für Windenergieanlagen aus EN-GJS-700-2U, Gewicht 2,8 t (Bild: Flender Guss, Wittgensdorf)

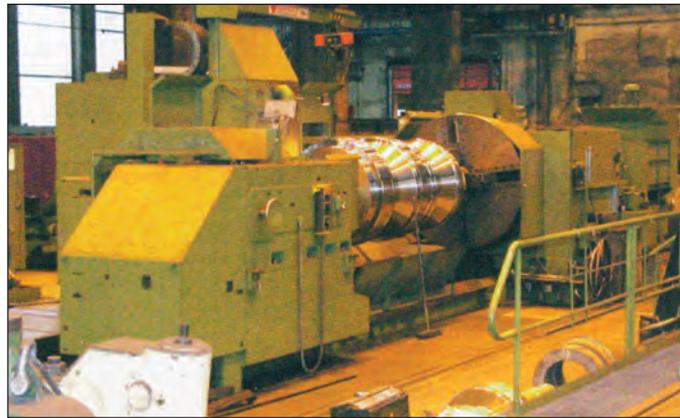


Bild 200: Kalibrierung einer Gusswalze (perlitisches und bainitisches GJS kommt hier zur Anwendung) auf einer CNC-Bearbeitungsmaschine (Bild: Walzengießerei, Coswig)

9.8 Bearbeitung von ADI-Gusseisen

Die Eigenschaftskombination aus hoher Festigkeit und erhöhter Duktilität macht ADI (siehe Kapitel 8.2) zu einem im Vergleich zu gewöhnlichem Gusseisen mit Kugelgraphit schwieriger zu bearbeitenden Werkstoff, der höhere Anforderungen an die thermischen Eigenschaften der Schneidstoffe stellt. Um übermäßigen Kolkverschleiß durch die freiwerdende Verformungsenergie zu vermeiden, können beschichtete Hartmetall-Werkzeuge bereits bei der Bearbeitung von EN-GJS-900-7 nur mit relativ geringen Schnittgeschwindigkeiten von 120 bis 200 m/min eingesetzt werden. Bei der Bearbeitung von ADI-Werkstoffen wirkt sich die Anwendung von Kühlschmierstoffen Standzeit erhöhend aus. Je nach Fertigungsverfahren lassen sich mit speziellen, auf die ADI-Bearbeitung abgestimmten Werkzeuggeometrien die Standzeiten erhöhen. So werden mittlerweile Hartmetall-Bohrer angeboten, bei denen ein Radienanschliff die Gefahr von Ausbrüchen an den hochbelasteten Ecken drastisch reduziert.

Mit Schneidkeramik (Aluminiumoxid) kann die Schnittgeschwindigkeit unter günstigen Bedingungen bis 400 m/min gesteigert werden. Siliciumnitridkeramik und CBN sind für hochduktilen ADI nicht einsetzbar [111].

Bezüglich der als schwierig geltenden Bearbeitung haben neuere Untersuchungen gezeigt, dass ADI grundsätzlich nicht schwerer zu zerspanen ist als höherfeste GJS-Sorten. Allerdings sind spezielle an den Werkstoff angepasste Spanungsstrategien erforderlich, die sich von der Vorgehensweise beim Gusseisen mit Kugelgraphit deutlich unterscheiden, denn die hohe Wärmeentwicklung erfordert bei der ADI-Bearbeitung abgesenkte Schnittgeschwindigkeiten im kontinuierlichen Schnitt. Dieser Produktivitätsverlust kann aber durch erhöhte Vorschübe ausgeglichen werden. PKD und CBN sind zwar nicht geeignet, aber Hartmetallschneiden mit

speziell abgestimmter Schneide sind einsetzbar. Untersuchungen ergaben, dass bei der Zerspaltung von EN-GJS-800-8 (ADI) ein ähnliches Kraftniveau wie beim EN-

GJS-600-3 vorliegt. Bei der Fräsbearbeitung konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen dem EN-GJS-800-8 und dem EN-GJS-700-2 nachgewiesen werden.



Bild 201: Schwungscheibe für einen PKW-Motor aus EN-GJS-500-7, Gussgewicht 8,6 kg (Bild: ZGV, Düsseldorf)



Bild 202: Viele Gießereien verfügen heute über eigene Bearbeitungskapazitäten (links) und entsprechende Messtechnik (rechts), so dass sie in der Lage sind, vor- und fertigbearbeitete Bauteile und teilweise auch montierte Baugruppen auf Kundenwunsch zu liefern (Bild: Heidenreich & Harbeck, Mölln)

10 Werkstoffe mit besonderen Eigenschaften

Neben den Normsorten gibt es beim Gusseisen mit Kugelgraphit noch legierte Sorten mit speziellen Eigenschaften für erweiterte Anwendungsbereiche, die nachfolgend kurz vorgestellt werden. Für diese Sorten gibt es gesondertes Schriftmaterial bei der Zentrale für Gussverwendung in Düsseldorf, das unter den angegebenen Schriftumsangaben bei Bedarf bezogen werden kann.

10.1 Austenitische Gusseisen mit Kugelgraphit

Die austenitischen Gusseisen mit Kugelgraphit nach **EN 13835** sind hoch legierte Gusseisenwerkstoffe, die in Bezug auf Korrosionsbeständigkeit, Hitze- und Zunderbeständigkeit, Kaltzähigkeit, Nichtmagnetisierbarkeit, Verschleißbeständigkeit sowie besonders hohe oder niedrige thermische Ausdehnungskoeffizienten optimiert sind. Diese Werkstoffgruppe wird ausführlich in [10, 227, 228] beschrieben. Die Norm **EN 13835** enthält insgesamt zehn Sorten mit Kugelgraphit.

Austenitische Gusseisen haben, wie der Name sagt, eine austenitische Grundmasse. Sie werden vielfach kurz mit dem Handelsnamen „Ni-Resist“ bezeichnet. Im Gegensatz zu den üblichen Normen für Gusseisen, wo nur die Eigenschaften vorgeschrieben werden, legt die Norm für die austenitischen Gusseisen wie bei legierten Stahlgussorten auch die chemische Zusammensetzung fest, da die

Eigenschaften hiervon in besonderem Maße abhängig sind. In der **Tabelle 19** sind die mechanischen Eigenschaften nach **EN 13835** und in der **Tabelle 20** ein Vergleich der Sorten und Bezeichnungen nach **DIN 1694** und **EN 13833** sowie Handelsnamen enthalten.

Um den Austenit bis zu tiefen Temperaturen stabil zu machen, ist ein Mindestgehalt an Nickel, Mangan und Chrom erforderlich. Die drei Elemente werden in einem Nickel-Äquivalent = % Ni + % Cr + 2 x % Mn zusammengefasst, das über etwa 20 % liegen sollte. In Fällen, wo ein absolut stabil austenitisches Gefüge verlangt wird, sollte es mindestens 23,5 % sein. Bei niedrigeren Werten kann sich unter Umständen beim Spannungsarmglühen oder bei tiefen Temperaturen Martensit bilden, der den Werkstoff versprödet. Ein Ersatz von Nickel durch Mangan ist nur bei der kaltzähen Sorte möglich, da Mangan keinen Beitrag zur Korrosionsbeständigkeit oder Hitzebeständigkeit liefert. Chrom muss aus Gründen der Zähigkeit und Bearbeitbarkeit auf 2 bis 3 % begrenzt werden.

Fast alle Sorten haben gute bis sehr gute Korrosionsbeständigkeit, Zunderbeständigkeit und Kaltzähigkeit. Die wichtigsten Sorten sind EN-GJSA-XNiCr20-2 und EN-GJSA-XNiCrNb20-2 als korrosionsbeständige Sorten und EN-GJSA-XNiSiCr35-5-2 als hitzebeständiger Werkstoff. Der Nickelgehalt ist wesentlich für die Korrosions- und Zunderbeständigkeit. Chrom ist vor allem für die Verschleißbeständigkeit wichtig, Silicium für hohe Zunderbeständigkeit.

Der Nickelgehalt beeinflusst die physikalischen Eigenschaften des Werkstoffs. Der thermische Ausdehnungskoeffizient ist

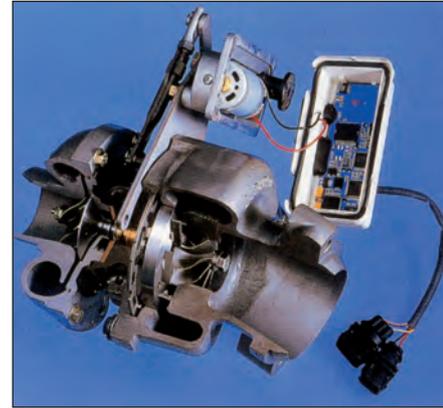


Bild 203: Turbolader für V8-Bi-Turbodieselmotor aus EN-GJSA-XNiSiCr35-5-2 und einem Feingussteil Turbinenlaufrad aus einer hoch warmfesten Nickellegierung (Bild: BMW, München)

bei etwa 20 % Ni am höchsten, sinkt mit steigendem Nickelgehalt und erreicht bei etwa 35 % ein Minimum. Die Sorten mit rund 20 % Nickel und die manganhaltigen Sorten sind nicht magnetisierbar. Von etwa 26 % Ni an wird das austenitische Gusseisen wieder magnetisch.

EN-GJSA-XNiCr20-2 und EN-GJSA-XNiCrNb20-2 werden vor allem als korrosionsbeständige Werkstoffe verwendet. Im Gegensatz zu Edeltählen sind sie allerdings nicht passivierbar, sondern ihre Korrosionsbeständigkeit beruht auf einer Schutzschicht aus nickelhaltigen Reaktionsprodukten. Das Haupteinsatzgebiet sind Seewasser beständige Gussteile, da sie im Gegensatz zu den meisten Edeltählen in stagnierendem Meerwasser nicht durch Lochfraßkorrosion gefährdet sind. Gelegentlich finden Sie auch als warmfeste und zunderbeständige Werkstoffe Verwendung.

Tabelle 19: Mechanische Eigenschaften der in EN 13835 genormten austenitischen Gusseisen

Werkstoffbezeichnung		Zugfestigkeit R _m [N/mm ²]	0,2 %-Dehn- grenze R _{p0,2} [N/mm ²]	Bruchde- hnung A [%]	Mittelwert für die Kerb- schlagarbeit A _{min.} ³⁾ [J]	Charpy-V- Kerbschlag- arbeit Av ²⁾ [J]	Elastizitäts- modul E ²⁾ [kN/mm ²]	Brinell- härte HB ²⁾	Druck- festigkeit R _D ²⁾ [N/mm ²]
Kurzzeichen	Werkstoff- Nummer								
Normalsorte									
EN-GJLA-XNiCuCr15-6-2	EN-JL3011	170 – 210	–	2	–	–	85 – 105	120 – 215	700 – 840
EN-GJSA-XNiCr20-2	EN-JS3011	370 – 480	210 – 250	7 – 20	13 ¹⁾	11 – 24	112 – 130	140 – 255	–
EN-GJSA-XNiMn23-4	EN-JS3021	440 – 480	210 – 240	25 – 45	24	20 – 30	120 – 140	150 – 180	–
EN-GJSA-XNiCrNb20-2	EN-JS3031	370 – 480	210 – 250	8 – 20	13 ¹⁾	11 – 24	112 – 130	140 – 200	–
EN-GJSA-XNi22	EN-JS3041	370 – 450	170 – 250	20 – 40	20	17 – 29	85 – 112	130 – 170	–
EN-GJSA-XNi35	EN-JS3051	370 – 420	210 – 240	20 – 40	–	18	112 – 140	130 – 180	–
EN-GJSA-XNiSiCr35-5-2	EN-JS3061	380 – 500	210 – 270	10 – 20	–	7 – 12	130 – 150	130 – 170	–
Sondersorte									
EN-GJLA-XNiMn13-7	EN-JL3021	140 – 220	–	–	–	–	70 – 90	120 – 150	630 – 840
EN-GJSA-XNiMn13-7	EN-JS3071	390 – 470	210 – 260	15 – 18	16	15 – 25	140 – 150	120 – 150	–
EN-GJSA-XNiCr30-3	EN-JS3081	370 – 480	210 – 260	7 – 18	–	5	92 – 105	140 – 200	–
EN-GJSA-XNiSiCr30-5-5	EN-JS3091	390 – 500	240 – 310	1 – 4	–	1 – 3	90	170 – 250	–
EN-GJSA-XNiCr35-3	EN-JS3101	370 – 450	210 – 290	7 – 10	–	4	112 – 123	140 – 190	–

¹⁾ Freigestellte Anforderung nach Vereinbarung zwischen Hersteller und Käufer

²⁾ Nicht genormt

³⁾ Mittelwert für die Kerbschlagarbeit aus 3 Versuchen an Charpy-V-Proben nach EN 10045-1

Tabelle 20: Übersicht der nationalen und internationalen (teilweise nicht mehr gültigen) Normen und Bezeichnungen der austenitischen Gusseisen und übliche Handelsnamen

Werkstoffbezeichnung nach EN 13835		DIN1694:1981	ASTM A 436: 1984	ASTMA 439:1983 ASTMA 571:1984	BS 3468: 1962	BS 3468: 1986	ISO2892: 1973 BS3468: 1974	NFA32-301: 1992	Internationaler Handelsname
Kurzzeichen	Werkstoffnummer								
Lamellengraphit									
EN-GJLA-XNiCuCr15-6-2	EN-JL3021	GGL-NiMn 13 7	-	-	-	-	L-NiMn 13 7	FGL Ni13 Mn7	Nomag
EN-GJLA-XNi Mn13-7	EN-JL3011	GGL-NiCuCr 15 6 2	Type 1	-	AUS 101A	F1	L-NiCuCr 15 6 2	FGL Ni15 Cu6 Cr 2	Ni-Resist 1
-	-	GGL-NiCuCr 15 6 3	Type 1b	-	AUS 101B	F1	L-NiCuCr 15 6 3	FGL Ni15 Cu6 Cr3	Ni-Resist 1b
-	-	GGL-NiCr 20 2	Type 2	-	AUS 102A	F2	L-NiCr 20 2	FGL Ni20 Cr2	Ni-Resist 2
-	-	GGL-NiCr 20 3	Type 2b	-	AUS 102B	F2	L-NiCr 20 3	FGL Ni20 Cr3	Ni-Resist 2b
-	-	GGL-NiSiCr 20 5 3	-	-	AUS 104	-	L-NiSiCr 20 5 3	FGL Ni20 Si5 Cr3	-
-	-	-	Type 3	-	AUS 105	F3	L-NiCr 30 3	FGL Ni30 Cr3	Ni-Resist 3
-	-	GGL-NiCr 30 3	Type 4	-	-	-	L-NiSiCr 30 5 5	FGL Ni30 Si5 Cr5	-
-	-	GGL-NiSiCr 30 5 5	Type 5	-	-	-	L-Ni35	FGL Ni35	-
Kugelgraphit									
EN-GJSA-XNiMn13-7	EN-JS3071	GGG-NiMn13 7	-	-	-	S6	S-NiMn 13 7	FGS Ni13 Mn7	Nodumag
EN-GJSA-XNiCr20-2	EN-JS3011	GGG-NiCr 20 2	-	D2	AUS 202A	S2	S-NiCr 20 2	FGS Ni20 Cr2	Ni-Resist D-2
EN-GJSA-XNiCrNb20-2	EN-JS3031	GGG-NiCrNb 20 2	-	-	-	S2W	-	FGS Ni20 Cr2 Nb 0,15	-
-	-	GGG-NiCr 20 3	-	D2B	AUS 202B	S2B	S-NiCr 20 3	FGS Ni20 Cr3	-
-	-	GGG-NiSiCr 20 5 2	-	-	-	-	-	FGS Ni20 Si5 Cr2	Nicrosilalpheronic
EN-GJSA-XNi22	EN-JS3041	GGG-Ni 22	-	D2C	AUS 203	S2C	S-Ni 22	FGS Ni22	Ni-Resist D-2C
EN-GJSA-XNiMn23-4	EN-JS3021	GGG-NiMn 23 4	-	D2M ¹⁾	-	S2M	S-NiMn 23 4	FGS Ni23 Mn4	Ni-Resist D-2M
-	-	GGG-NiCr 30 1	-	D3A	-	-	S-NiCr 30 1	FGS Ni30 Cr1	Ni-ResistD-3A
EN-GJSA-XNiCr30-3	EN-JS3081	GGG-NiCr 30 3	-	D3	AUS 205	S3	S-NiCr 30 3	FGS Ni30 Cr3	Ni-Resist D-3
-	-	GGG-NiSiCr 30 5 2	-	-	-	-	-	FGS Ni30 Si5 Cr2	-
EN-GJSA-XNiSiCr30-5-5	EN-JS3091	GGG-NiSiCr 30 5 5	-	D4	-	-	S-NiSiCr 30 5 5	FGS Ni30 Si5 Cr5	Ni-Resist D-4
EN-GJSA-XNi35	EN-JS3051	GGG-Ni 35	-	D5	-	-	S-Ni 35	FGS Ni35	Ni-Resist D-5
EN-GJSA-XNiCr35-3	EN-JS3101	GGG-NiCr 35 3	-	D5B	-	-	S-NiCr 35 3	FGS Ni35 Cr3	Ni-Resist D-5B
EN-GJSA-XNiSiCr35-5-2	EN-JS3061	GGG-NiSiCr 35 5 2	-	D5S	-	S5S	-	FGS Ni35 Si5 Cr2	Ni-Resist D-5S

¹⁾ Austenitisches Gusseisen mit Kugelgraphit für Druckbehälter für Tieftemperaturbetrieb

EN-GJSA-XNi22 und EN-GJSA-XNiMn23-4 werden in der Tieftemperaturtechnik eingesetzt. Vor allem EN-GJSA-XNiMn23-4 ist speziell als Tieftemperaturwerkstoff entwickelt worden und hat nur eine geringe Korrosionsbeständigkeit.

EN-GJSA-XNi30-3 hat eine erhöhte Korrosionsbeständigkeit und findet auch als Werkstoff Verwendung, bei dem durch Variation des Nickelgehaltes der ther-

mische Ausdehnungskoeffizient in relativ engen Grenzen eingestellt werden kann.

EN-GJSA-XNiSiCr30-5-5, EN-GJSA-XNiCr30-3 und EN-GJSA-XNiCr35-5-2 zeichnen sich dank des hohen Siliciumgehalts durch eine hohe Zunderbeständigkeit aus und sind aufgrund des niedrigen thermischen Ausdehnungskoeffizienten auch gegen Temperaturwechsel und thermomechanische Beanspruchungen gut beständig [10, 229].

EN-GJSA-XNi35 wird als Werkstoff mit sehr niedrigem thermischem Ausdehnungskoeffizienten eingesetzt.

Aus EN-GJSA-XMnNi13-7 werden nicht-magnetisierbare Gussstücke hergestellt.

Ausführlich werden die austenitischen Gusseisensorten in [9 und 10] beschrieben. Die Quellen können bei der Zentrale für Gussverwendung in Düsseldorf bezogen werden.



Bild 204: Turbinengehäuse aus austenitischem Werkstoff (Ni-Resist) komplexer Gestalt (Bild: Hasenclever, Battenberg)



Bild 205: Dünnwandiger Abgaskrümmter für 8-Zylinder-Otto- und Dieselmotoren aus EN-GJSA-XNiSiCr35-5-2 (Bild: Montforts, Mönchengladbach)

10.2 Carbidisches Gusseisen mit Kugelgraphit

Die Verschleißbeständigkeit von Gusseisen mit Kugelgraphit kann durch freie Carbide, das heißt Anteile von Ledeburit, erheblich gesteigert werden. Carbidisches Gusseisen mit Kugelgraphit lassen sich erzeugen, in dem eine an sich weiß erstarrende Gusseisenschmelze mit Magnesium behandelt, normales Gusseisen mit Kugelgraphit mit Chrom legiert oder die Schmelze gegen eine Schreckplatte oder in Kokille gegossen wird. Je nach Abstand von der abgeschreckten Oberfläche entsteht bei letztgenanntem Verfahren ein Gradientengefüge, bei dem der Carbidgehalt von der Außenseite zum Kern hin abnimmt. Über die Einstellung der chemischen Zusammensetzung und der Impfung lässt sich der Carbidgehalt in weiten Grenzen variieren (Tabelle 21).

Durch entsprechendes Legieren mit Nickel, Molybdän und Kupfer kann man eine martensitische oder bainitische Grundmasse erreichen, die ebenfalls zur Steigerung der Verschleißbeständigkeit beiträgt (Tabelle 22). Die Härte dieser Werkstoffe liegt je nach Carbidgehalt und Grundmasse zwischen 300 und 550 HB. Der Vorteil eines derartigen Gefüges gegenüber rein carbidischen Gusseisensorten sind geringere Rissanfälligkeit und höhere Thermoschockbeständigkeit. Die Verschleißbeständigkeit ist allerdings etwas geringer.

Die wichtigste Anwendung von carbidischen Gusseisen mit Kugelgraphit sind Walz-

Tabelle 21: Verschleißbeständige carbidische Gusseisen-Werkstoffe nach DIN EN, DIN, ASTM sowie deren Handelsnamen

Werkstoffsorte nach DIN EN 12 513		Werkstoffsorte nach DIN 1695		Werkstoffsorte nach ASTM A 532	Handelsname
Kurzzeichen EN-	Nummer EN-	Kurzzeichen	Nummer		
-	-	G-X 300 NiMo 3 Mg	0.9610	-	-
GJN-HV350	JN2019	-	-	-	-
GJN-HV520	JN2029	G-X 260 NiCr 4 2	0.9620	Class I Type B Ni-Cr-LC	Ni-Hard 2
GJN-HV550	JN2039	G-X 330 NiCr 4 2	0.9625	Class I Type B Ni-Cr-HC	Ni-Hard 1
GJN-HV600	JN2049	G-X 300 CrNiSi 9 5 2	0.9630	Class I Type D Ni-HiCr	Ni-Hard 4
GJN-HV600(XCr11)	JN3019	-	-	Class II Type A 12 % Cr	-
GJN-HV600(XCr14)	JN3029	G-X 300 CrMo 15 3 G-X 300 CrMoNi 15 2 1	0.9635 0.9640	Class II Type B 15 % CrMo	15-3 15-2-1
GJN-HV600(XCr18)	JN3039	G-X 260 CrMoNi 20 2 1	0.9645	Class II Type D 20 % CrMo	20-2-1
GJN-HV600(XCr23)	JN3049	G-X 260 Cr 27 G-X 300 CrMo 27 1	0.9650 0.9655	Class III Type A 25 % Cr	-

werkswalzen [230]. Weitere Anwendungen Verschleißteile (Bilder 206 und 207)

Eine neuere Entwicklung ist carbidhaltiges ADI, das als CADI bezeichnet wird. Es wird durch Legieren von ADI mit Chrom erzeugt und enthält nach der Wärmebehandlung etwa 5 % Carbide bei 0,5 % Cr und 17 % bei 1 % Cr. Seine Verschleißbeständigkeit liegt zwischen der von üblichem ADI und martensitischem weißen Gusseisen EN-GJN-HV550 (Ni-Hard 1) [231 - 232] (Bild 207).

Weiterführende Informationen zum CADI sind in [232] und zu den Carbidischen Gusseisen in [233] enthalten, die bei der Zentrale für Gussverwendung in Düsseldorf bezogen werden können.

10.3 Gusseisen mit Vermiculargraphit (GJV)

Gusseisen mit Vermiculargraphit ist seit 2006 international in ISO 16112 „Cast iron with compacted (vermicular) graphite“ [234] genormt. Die Norm basiert im Wesentlichen auf dem VDG-Merkblatt W 50 [235] und der ASTM-Norm A842-85 [236]. Es wird in ähnlicher Weise wie Gusseisen mit Kugelgraphit durch Schmelzbehandlung mit Magnesium hergestellt, daher auch die kompakte Ausbildungsform des Graphits. Früher wurde es als ein „Zwischending“ zwischen Gusseisen mit Lamellen- und Gusseisen mit Kugelgraphit betrachtet, dennoch ist es ein eigenständiger Werkstoff, der hier erwähnt wird, damit der Unterschied zum Gusseisen mit Kugelgraphit deutlich wird.

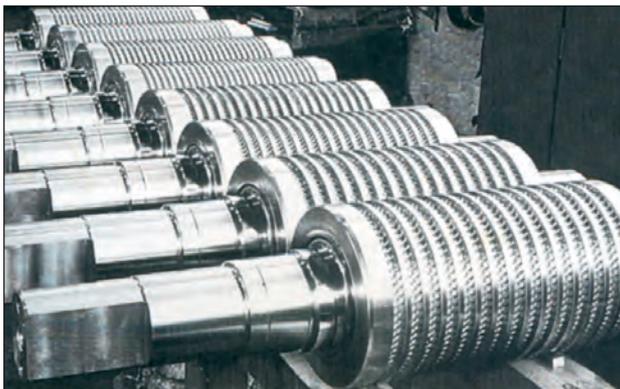


Bild 206: Kalibrierwalzen aus GJS für das Fertigwalzen von Betonrippenstahl, Stückgewicht 700 kg, Abmessungen Dmr. 380 x 650 mm Ballenlänge (Bild: ZGV, Düsseldorf)



Bild 207: Verschleißbeständige Spitzbeinschutzteile aus aus dem Werkstoff CADI (Bild: Simba Ltd)

Tabelle 22: Einteilung der wichtigsten verschleißbeständigen weißen Gusseisenwerkstoffe

Werkstoffgruppe	Typische Legierungselemente	Handelsname	Härte HB ¹	Carbide	Grundmasse
Perlitischer Hartguss (un- oder niedriglegiert)	-	-	bis 480	Fe ₃ C	Perlit
Martensitische weiße Gusseisen (mittellegiert)	Ni, Cr	Ni-Hard 1 und 2	bis 700	M ₃ C ²	Martensit, Austenit
Chromgusseisen (hochlegiert)	Cr, Ni, Si Cr, Mo, Ni, Cu	Ni-Hard 4 15-3, 20-2-1	bis 700 bis 850	M ₇ C ₃ , M ₃ C ² Cr-Sondercarbide	Martensit, Austenit Martensit, Austenit
Sondergusseisen	Cr, Mo, Ni Cu, Nb, V, W	-	bis 900	Sondercarbide	Martensit, Austenit Ferrit

¹ Anhaltswerte

² M = Fe, Cr, Mo

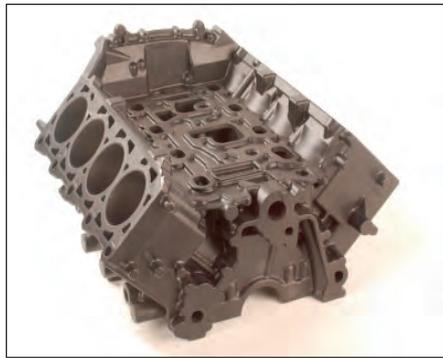


Bild 208: V8-TDI-Motorblockgussteil aus GJV (Bild: Halberguss, Saarbrücken)

Seine Zwischenposition ist eindrucksvoll im **Bild 209** gezeigt. Näher am Werkstoff mit Lamellengraphit (GJL) sind Wärmeleitfähigkeit, Dämpfungsvermögen sowie Gleit- und Reibverhalten, die sämtlich auf die GJL-ähnliche Verzweigung des korallenbaumartig kristallisierenden Graphits (**Bild 210**) zurückzuführen sind. Dieser Graphit bricht zum Beispiel unter Reibbelastung nicht aus der metallischen Grundmasse heraus, sondern bleibt fest darin verankert. Näher am Werkstoff mit Kugelgraphit (GJS) sind jedoch E-Modul, und Dauerwechselfestigkeit. Diese Gemeinsamkeiten, merkwürdigerweise aber auch die Note „ausreichend“ in Duktilität, die ihm eine GJL-ähnliche hohe zulässige Flächenpressung verleiht, definieren die erwähnte Eigenständigkeit und den vorzugsweisen Einsatz von GJV im Motorenbau.

Nach der „Neuentdeckung“ des GJV zu Beginn der neunziger Jahre des 20. Jhs., als es erstmalig möglich wurde, die Grenzen zu GJL einerseits und zu GJS andererseits metallurgisch zu kontrollieren, werden Bauteile für diesen Anwendungsbereich wie Zylinderblöcke- und -köpfe sowie Zylinderlaufbüchsen vom Schiffsdiesel bis zum PKW-Motor in großen Stückzahlen produziert. Weitere Beispiele sind Abgasrohre sowie Pumpen- und Hydraulik-Ventilgehäuse. GJV ist aus der einst prophezeiten „Nischenposition“ längst herausgetreten.

GJV wird in den Festigkeitsklassen von 300 bis 500 N/mm² geliefert. Die Daten in der **Tabelle 23** wurden auszugsweise der **ISO 16112** entnommen. Die Zugfestigkeit

Tabelle 23: Mechanische Eigenschaften von Gusseisen mit Vermiculargraphit, gemessen an Proben aus getrennt gegossenen Probekörpern nach VDG-Merkblatt W 50

Werkstoff EN-...	Rm [N/mm ²]	Rp _{0,2} [N/mm ²]	A [%]	E-Modul [kN/mm ²]	λ (23 °C) [W/m.K]	HBW
GJV-300	300 - 375	210 - 295	1,5	130 - 145	45	140 - 210
GJV-350	350 - 425	260 - 335	1,5	135 - 150	45	160 - 220
GJV-400	400 - 475	300 - 375	1,0	140 - 150	40	180 - 240
GJV-450	450 - 525	340 - 415	1,0	145 - 155	40	200 - 250
GJV-500	500 - 575	380 - 455	0,5	145 - 160	35	220 - 260

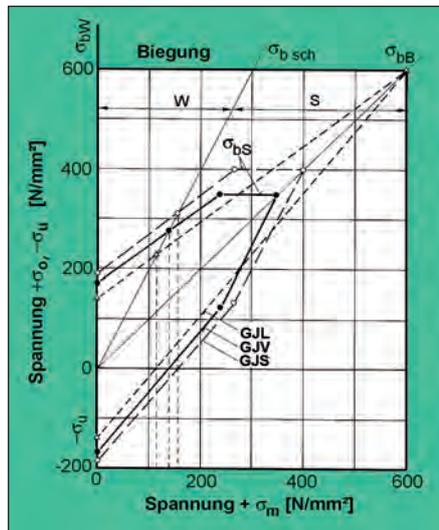


Bild 209: Vergleich der Biegewechselfestigkeitskurven von GJL, GJV und GJS im Dauerfestigkeitsschaubild nach Goodman

von GJV ist wanddickenabhängig und lässt sich für verschiedene Querschnitte aus der notwendigerweise bekannten Zugfestigkeit der getrennt gegossenen sogenannten Y-Probe wie folgt berechnen:

$$Rm_y = Rm_x + 0,50 (\ln M_x - \ln M_y) \quad (12)$$

Darin sind

Rm_y - unbekannte Zugfestigkeit eines Querschnitts mit Modul M_y

Rm_x - bekannte Zugfestigkeit der getrennt gegossenen Probe mit dem Modul M_y

Modul-Verhältnis des Volumens eines Querschnitts zu dessen wärmeleitfähiger Oberfläche (V/O) in cm.

Für eine Platte beträgt er etwa die halbe Wanddicke und bei einem Rundstab ein Viertel des Durchmessers in cm.

Eine auf der Basis von etwa 500 Messungen basierende Korrelation zwischen Dehngrenze und Zugfestigkeit lautet:

$$Rp_{0,2} = 0,8 \cdot Rm - 5 \quad (13)$$

Ausführliche Informationen zum Werkstoff Gusseisen mit Vermiculargraphit sind in [237] enthalten. Die Informationsschrift kann bei der Zentrale für Gussverwendung in Düsseldorf angefordert werden.

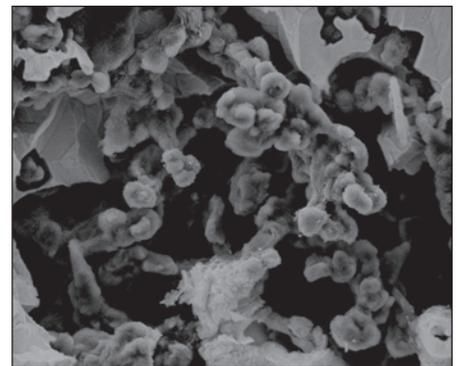


Bild 210: REM-Darstellung des verzweigten, korallenbaumartigen Wachstums von Vermiculargraphit

10.4 SiMo-Gusseisen

Während GJV-400SiMo als Werkstoff für Abgaskrümmen schon eine lange Tradition hat, wurde GJS erst in den 1960er Jahren für diesen Zweck erprobt. Die ersten Tests wurden von GM-Opel im Rahmen einer Diplomarbeit [238] durchgeführt. Als Versuchsobjekt dienten auf Restwanddicken von 3, 3,3 und 3,6 mm aufgebohrte Probestäbe (**Bild 211**). Ziel war eine Simulation der Temperaturwechselbelastung eines Abgasrohres zwischen 20 und 600 beziehungsweise 700 °C. Als Bewertungsmaßstab diente eine in Vorversuchen erstellte Richtreihe mit sechs Rissklassen, Durchriss nicht inbegriffen. Geprüft wurden EN-GJS-700-2, GJV-400SiMo sowie auch zwei Varianten des Gusseisens mit Lamellengraphit (GJL-250CrMo und GJL-250MoSnN), die zuvor im Hinblick auf Verwendung für Pkw-Zylinderköpfe geprüft worden waren, und von denen die zweite so erfolgreich war, dass sie auch heute noch Einsatz findet. Darüber wurde bereits berichtet [239]. Die chemische Zusammensetzung der drei Werkstoffe enthält **Tabelle 24**.

Die Ergebnisse dieser Tests für 700 °C sind aus **Bild 213** ersichtlich. GJL-250CrMo versagte nahezu linear, das ferritische GJV-400SiMo und das ursprünglich perlitische GJS-700 erwiesen sich als praktisch gleichwertig, wobei im Fall von GJS zu erwähnen ist, dass nach 600 Zyklen der Perlit nur bis zur körnigen Ausbildung umgewandelt wurde. Es lag also nahe, den Werkstoff von vornherein in die „SiMo“-Klasse zu erheben. und aus der nodularen Graphitbildung gegenüber GJV Vorteile zu gewinnen.

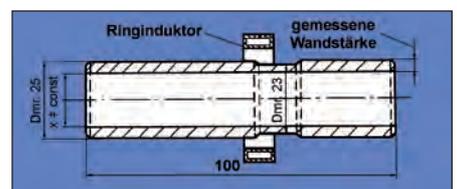


Bild 211: Probekörper mit Ringinduktor [1] und durch Wasserkühlung geregelttem Temperaturgradienten



Bild 212: Abgaskrümmer für einen statischen Großdieselmotor aus GJS-SiMo5-1, Gewicht 82 kg, Abmessungen 850 x 555 x 380 mm (Bild: CLAAS GUSS, Bielefeld)

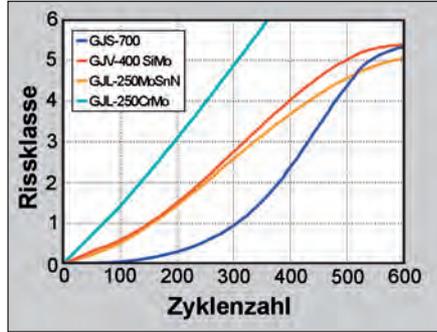


Bild 213: Lastwechselspiele zwischen 20 und 700 °C für vier Gusseisensorten mit der Probe nach Bild 1, Bewertungsmaßstab: Rissklasse [244]



Bild 214: Turbolader für einen wassergekühlten Volvo-Bootsmotor aus GJS-SiMo (Bild: 3K-Warner, Kirchheimboladen)

Tabelle 24: Chemische Zusammensetzung der im Bild 213 dargestellten Werkstoffe (in [%])

Werkstoff	C	Si	Mn	Cu	Cr	Mo	Mg
GJL-250 CrMo	3,38	2,22	0,56	0,33	0,38	0,59	-
GJL-250 MoSnN	3,47	1,74	0,56	0,30	0,19	0,27	-
GJV-400 SiMo	3,72	3,08	0,35	0,09	0,05	0,80	0,025
GJS-700	3,58	2,25	0,29	1,05	0,06	0,01	0,062

Aber auch GJS hat Nachteile:

- Höhere Siliciumgehalte verspröden den Ferrit. Zusammen mit Spannungen, die durch einen hohen E-Modul aufgebaut werden, kann dies bei einem Bodenkontakt im Fahrbetrieb zu Abrissen führen.
- Der höhere E-Modul führt, gepaart mit niedriger Wärmeleitfähigkeit, zum Verzug. Die niedrige Wärmeleitfähigkeit wiederum und damit ein hoher Temperaturunterschied zwischen kalter und warmer Seite des Gussteils kann bei hohen Abgastemperaturen vor allem in der kritischen Situation des Motorabschaltens zu Rissen führen.

Auf diese Weise müsste die Verwendung von GJS-500SiMo bei hohen Abgastemperaturen auf Fahrzeuge mit viel Bodenfremtheit und/oder Motoren mit der kühlereitig eingebauten Abgasanlage beschränkt werden.

Die „magische“ Zahl von 1050 °C ist ein asymptotischer Wert, de facto werden bei dieser Abgastemperatur bereits austenitische Sorten eingesetzt.

Eine Übersicht der wichtigsten Merkmale der GJS-Werkstoffe für Abgasanlagen ist in den **Tabellen 25** und **26** enthalten. Für weiterführende Informationen sei die Quelle [8] empfohlen.

Tabelle 25: Chemische Zusammensetzung einiger GJS-Werkstoffe für Abgasanlagen (in [%])

SAE J2582 (Entwurf)					
Werkstoff	C	Si	Mo	Cr	Ni
1		3,5 - 4,5	max. 0,5		
2		idem	0,51 - 0,70		
3		idem	0,71 - 1,00		
VW 50021:2006-12					
GJS-XSiMo5-1	3,0 - 3,6	4,0 - 5,0	0,80 - 1,00	max. 0,5	max. 0,6
GJS-XSiCrMo4,6-0,8-0,7	min. 2,9	4,4 - 4,8	0,55 - 0,70	0,70 - 0,85	max. 0,5
GJSAXNiCr30-2	max. 2,4	2,0 - 3,0	-	1,75 - 2,25	18,0 - 20,0
GJSA-XNiCr35-3	max. 2,0	2,0 - 3,0	-	2,25 - 2,75	34,0 - 36,0
GJSA-XNiSiCr35-5-2	2,8 - 3,6	4,5 - 5,5	-	1,75 - 2,25	34,0 - 36,0

Tabelle 26: Mechanische Eigenschaften einiger GJS-Werkstoffe für Abgasanlagen

SAE J2582 (Entwurf)					
Werkstoff	Härte HBW 5-750	Rm [MPa]	R _{p0,2} [MPa]	A _{5 mm} [%]	E-Modul [MPa]
1	187 - 241	> 450	≥ 275	≥ 8	> 152000
2	187 - 241	> 485	≥ 389	≥ 6	> 152000
3	196 - 269	> 515	≥ 415	≥ 4	> 152000
VW 50021:2006-12					
GJS-XSiMo5-1	200 - 260	> 520	≥ 420	≥ 5,0	
GJS-XSiCrMo4,6-0,8-0,7	200 - 265	> 620	≥ 500	≥ 6,0	
GJSAXNiCr30-2	140 - 200	> 370	≥ 200	≥ 10,0	
GJSA-XNiCr35-3	140 - 190	> 370	≥ 200	≥ 10,0	
GJSA-XNiSiCr35-5-2	130 - 260	> 370	≥ 200	≥ 10,0	

Von den beiden GJL-Sorten wurde leider nur die „bessere“ metallographisch untersucht: Nach 600 Zyklen fand noch keine Ferritisierung statt. Der Perlit und die Legierungs-carbide kugelten sich teilweise ein und die Grundmasse enthielt neben Restsorbit auch kubischen Martensit. Dies ist zweifellos in ersten Linie Ergebnis der hohen Wärmeleitfähigkeit. Ein solches „Vergütungsgefüge“ ist regelmäßig bei den sich autonom regenerierenden Brems-scheiben aus dem GJL-Werkstoff „VA-RIFER®“ zu beobachten. Die Tests werden heute hauptsächlich unter den realen Bedingungen eines Motorprüfstands durchgeführt und decken eine breit angelegte Verhaltensmatrix ab. Sie sind von Werk zu Werk verschieden und z.T. vertraulich.

Nachdem GJV-400SiMo bei Abgastemperaturen in der Größenordnung um 800 bis 850 °C praktisch die Grenzen der Leistungsfähigkeit erreichte, setzte man auf GJS-500SiMo mit über 5 % Si und etwa 1 % Mo, das Abgastemperaturen bis 950 °C widerstehen sollte. Zweckdienlich waren dabei die Verschiebung des Umwandlungsintervalls α - γ zu höheren Temperaturen. Sie ist Ergebnis der gemeinsamen Wirkung von Silicium, Chrom und Molybdän, die alle das γ -Gebiet stark einengen. Andererseits ist GJS gegenüber GJV wesentlich beständiger gegen innere Oxidation.

Im Verlauf der Beanspruchung überzieht sich die Oberfläche des Gussteils mit einer schützenden Fayalitschicht. Risse in dieser Schicht führen beim GJS nur zu einer weiteren Fayalitbildung. Dank der isolierten Graphiteinschlüsse findet aber kein Eindringen des Sauerstoffs in das Innere des Gussteils statt. Im GJV sind die Graphiteinschlüsse miteinander mehr oder weniger stark vernetzt, und eine Verzunderung entlang der Phasengrenzen Graphit/Matrix kann nicht mehr aufgehalten werden, es sei denn, die Verästelung wird durch metallurgische Maßnahmen begrenzt. Die Forderung nach einer solchen Begrenzung ist zum Beispiel Bestandteil der VW-Norm 50021 [240].

Normen und Richtlinien

Die Normen und Richtlinien für die Verwendung von Gusseisen mit Kugelgraphit als Konstruktionswerkstoff bieten eine Fülle an Informationen und Hinweisen für den Konstrukteur. Durch sie lassen sich die Anforderungen und Eigenschaften an ein spezifisches Bauteil definieren. Durch die Nutzung dieser Normen wird die Beschaffung von Gussteilen vereinfacht und sicher-

gestellt, dass die gelieferten Bauteile den Anforderungen des Konstrukteurs entsprechen. Durch die Definition der Anforderungen und der Grenzen, in denen bestimmte Qualitätsmerkmale schwanken dürfen, werden die Kosten im Kern beeinflusst. Hier ermöglicht der Dialog zwischen Konstrukteur, Gießer und Modell- und Werkzeugbauer, das große Leistungsvermögen

des Fertigungsverfahrens Gießen auch wirtschaftlich zu nutzen. Die Gießereitechnik bietet durch ihre vielfältigen Form- und Gießverfahren eine einmalige Basis für die prozesssichere Darstellung von Eigenschaftsprofilen. Die Anwendung der Normen, Richtlinien oder Spezifikationen ist ein Baustein zur konstruktiven Lösung aus einem Guss.

Bezeichnung von Gusseisen mit Kugelgraphit

Das Bezeichnungssystem für Gusseisen ist nach **DIN EN 1560** und international nach **ISO/TR 15931** genormt. Die Werkstoffe können entweder durch Kurzzeichen oder durch Nummern definiert werden. Kurzzeichen dürfen sowohl für genormte als auch nicht genormte Gusseisenwerkstoffe angewendet werden. Die Werkstoffnummern sind nur für die genormten Werkstoffe anwendbar. Die ISO/TR 15931 verwendet keine Werkstoffnummern.

Bezeichnungs-Beispiel:

Gusseisen mit Kugelgraphit mit einer Mindest-Zugfestigkeit von 400 N/mm² (MPa), einer Bruchdehnung von mindestens 18 %, einer gewährleisteten Kerbschlagarbeit bei -20 °C Temperatur (getrennt gegossene Probestücke)

Bezeichnungssystem nach	Kurzzeichen	Werkstoffnummer	Werkstoffnorm
DIN EN 1560	EN-GJS-400-18U-LT	EN-JS1020	DIN EN 1563
DIN 17007-3 (zurückgezogen)	GGG-40.3	0.7043	DIN 1692
ISO/TR 15931	ISO1083/JS/400-18LT/S	Keine	ISO 1083

Abkürzungen und Zeichen im europäischen Bezeichnungssystem (EN)

Die Bezeichnung der Normalsorten nach **EN-DIN 1564** erfolgt entsprechend den Angaben in der Tabelle (rechts).

Einige Gusseisenwerkstoffe werden nach ihrer chemischen Zusammensetzung bezeichnet. Dies trifft für die austenitischen und verschleißbeständigen Gusseisenwerkstoffe zu (zum Beispiel: EN-GJSA-XNiCuCr15-6-2).

Position	Zeichen	Beispiel
1	EN für Europäische Norm (kann entfallen, wenn in der Zeichnung die Nummer der Werkstoffnorm (EN 1563) angegeben wird)	EN
2	G für Gusstück (aus dem Deutschen) J für Eisen (engl.: iron; Anmerkung: „J“ könnte mit der „1“ verwechselt werden, deshalb „J“)	GJ
3	Graphitstruktur S = Kugelgraphit (engl.: spheroidal)	S
4	Mikro- bzw. Makrostruktur (entfällt bei GJS) Ausnahme: A - austenitisches Gusseisen	... (A)
5	Klassifizierung durch mechanische Eigenschaften (Zugfestigkeit in N/mm ² und Bruchdehnung in % oder alternativ durch die Härte) oder Klassifizierung durch chemische Zusammensetzung (Angabe der Elementsymbole + Gehalt in % (gerundet))	400-19
6	Zusätzliche Anforderungen LT - garantierte Kerbschlagarbeit bei tiefer Temperatur RT - garantierte Kerbschlagarbeit bei Raumtemperatur	LT
Auch 6	Art des Probestücks S - getrennt gegossen (engl.: separately cast) U - angegossen (engl.: cast-on = „united“) C - aus dem Gusstück entnommen (engl.: casting)	S

Abkürzungen und Zeichen im ISO-Bezeichnungssystem (ISO)

Hier ist also zunächst die komplette Normbezeichnung einschließlich der Nummer der Norm anzugeben, der Buchstabe „G“ für Gusswerkstoffe entfällt völlig.

Position	Zeichen	Beispiel
1	ISO für internationale Norm mit Nummer der Norm	ISO 1083
2	J für Eisen (engl.: iron; Anmerkung: „J“ könnte mit der „1“ verwechselt werden, deshalb „J“) Graphitstruktur S = kugelförmig (engl.: spheroidal)	J S
3	Klassifizierung durch mechanische Eigenschaften (Zugfestigkeit in N/mm ² und Bruchdehnung in % oder alternativ durch die Härte) oder Klassifizierung durch chemische Zusammensetzung (Angabe der Elementsymbole + Gehalt in % (gerundet))	400-18
4	Zusätzliche Anforderungen LT - garantierte Kerbschlagarbeit bei tiefer Temperatur RT - garantierte Kerbschlagarbeit bei Raumtemperatur Art des Probestücks S - getrennt gegossen (engl.: separately cast) U - angegossen (engl.: cast-on = „united“) C - aus dem Gusstück entnommen (engl.: casting)	LT U

Werkstoffnormen und Richtlinien

In der folgenden Tabelle sind die derzeit genormten beziehungsweise nicht genormten Werkstoffsorten aufgeführt. Angegeben ist die Bezeichnung der Norm entsprechend DIN, EN, ISO und ASTM/SAE. Grundsätzlich sollte die aktuellste Ausgabe der Normen verwendet werden.

Werkstoff-Gruppe	National (DIN)	Europäisch (EN)	International (ISO)	USA (ASTM / SAE)
Gusseisen mit Kugelgraphit / Sphäroguss Spheroidal cast irons / Ductile iron	DIN EN 1563 (Ersatz für DIN EN 1563 und DIN 1693)		ISO 1083	ASTM A536-84 (Ductile Iron Castings) A395/A395M-99 (Ferritic Ductile Iron Pressure-Retaining Castings for Use at Elevated Temperatures) A874/A874M-98 (Ferritic Ductile Iron Castings Suitable for Low-Temperature Service) SAE Standards J434 (Automotive Ductile (Nodular) Iron Castings) J2582 (Automotive Ductile Iron Castings for High Temperature Applications)
Bainitisches Gusseisen / Ausferritisches Gusseisen mit Kugelgraphit / Austempered ductile cast irons ADI / Ausferritic spheroidal graphite cast irons	DIN EN 1564 (Ersatz für DIN EN 1564)		ISO 17804	ASTM A897/A897M-06 (Austempered Ductile Iron Castings) SAE Standards J2477 (Automotive Austempered Ductile (Nodular) Iron Castings (ADI))

Produktnormen

Gusseisen mit Kugelgraphit wird in den verschiedensten Anwendungsbereichen eingesetzt. Für einige dieser gibt es entsprechende Normen, die nachfolgend aufgeführt sind.

Armaturen	DIN 3475, DIN 3476: Armaturen und Formstücke aus Gusseisen mit Kugelgraphit für Roh- und Trinkwasser DIN EN 1503-3: Armaturen - Werkstoffe für Gehäuse, Oberteile und Deckel - Teil 3: Gusseisen DIN EN 1171: Industriearmaturen - Schieber aus Gusseisen DIN EN 13789: Industriearmaturen - Ventile aus Gusseisen
Druckbehälter Dampfkessel	DIN EN 13445-6: Unbefeuerte Druckbehälter - Teil 6: Anforderungen an die Konstruktion und Herstellung von Druckbehältern und Druckbehälterteilen aus Gusseisen mit Kugelgraphit AD 2000-Merkblatt W 3/2: Gusseisenwerkstoffe; Gusseisen mit Kugelgraphit, unlegiert und niedrig legiert TRD 108: Gusseisen mit Lamellengraphit und Gusseisen mit Kugelgraphit
Rohre und Formstücke	DIN 28601: Rohre und Formstücke aus duktilem Gusseisen - Schraubmuffen-Verbindungen DIN 28602: Rohre und Formstücke aus duktilem Gusseisen - Stopfenmuffen-Verbindungen DIN EN 545: Rohre, Formstücke, Zubehörteile aus duktilem Gusseisen und ihre Verbindungen für Wasserleitungen - Anforderungen und Prüfverfahren DIN EN 598: Rohre, Formstücke, Zubehörteile aus duktilem Gusseisen und ihre Verbindungen für die Abwasser-Entsorgung - Anforderungen und Prüfverfahren DIN EN 969: Rohre, Formstücke, Zubehörteile aus duktilem Gusseisen und ihre Verbindungen für Gasleitungen - Anforderungen und Prüfverfahren DIN EN 15189: Rohre, Formstücke und Zubehörteile aus duktilem Gusseisen - Polyurethan-Umhüllungen von Rohren DIN EN 15542: Rohre, Formstücke und Zubehör aus duktilem Gusseisen - Zementmörtel-Umhüllung von Rohren
Flansche und Verbindungen	DIN EN 1092-2: Flansche und ihre Verbindungen - Runde Flansche für Rohre, Armaturen, Formstücke und Zubehörteile, nach PN bezeichnet - Teil 2: Gusseisenflansche DIN EN 1092-2: Flansche und ihre Verbindungen - Runde Flansche für Rohre, Armaturen, Formstücke und Zubehörteile DIN EN 14525: Grobbleichkupplungen und -flanschadapter aus duktilem Gusseisen zur Verbindung von Rohren aus unterschiedlichen Werkstoffen

Informationen zu den nationalen Normen der anderen Länder

Nationale Normenverbände unter:

Australien: www.Standards.com.au
 Belgien: www.ibn.be
 Canada: www.scc.ca
 Dänemark: www.ds.dk
 Deutschland: www.din.de
 Finnland: www.sfs.fi
 Frankreich: www.afnor.fr
 Großbritannien: www.bsi-global.com
 Indien: www.bis.org.in

Italien: www.uni.com
 Japan: www.jisc.org
 Niederlande: www.nen.nl
 Norwegen: www.standard.no
 Österreich: www.on-norm.at
 Schweden: www.sis.se
 Schweiz: www.snv.ch
 Spanien: www.aenor.es
 Südafrika: www.sabs.co.za

Länderübergreifende Normen unter:

Internationale Normen: www.iso.ch
 Europäische Normen: www.cenorm.be

Lieferbedingungen und Toleranzen

Das System für technische Lieferbedingungen spezifiziert die vom Besteller anzugebenden Bezeichnungen, Informationen über das Herstellungsverfahren einschließlich Schweißungen, Anforderungen an Werkstoffe und Gussstücke einschließlich Prüfungen, Bescheinigungen über die Werkstoffprüfung, Kennzeichnung, Verpackung und Beanstandungen. Bei der Anwendung der Normen für die technischen Lieferbedingungen (**Tabelle oben**) ist zu beachten, dass sich die „Philosophie“ gegenüber den früheren DIN-Normen verändert hat. Erfasste Teil 2 der **DIN 1690** noch die höchstzulässigen Anzeigen für die zerstörungsfreien Prüfverfahren und die Einteilung in Gütestufen, so sind diese heute integraler Bestandteil der Europäischen Normen für die zerstörungsfreien Prüfverfahren.

Prüfverfahren

Für die Prüfung der mechanisch-technologischen Kennwerte sind die jeweils aktuellen Fassungen der Normen anzuwenden.



Bild 215: Gasturbinen-Verdichtergehäuse, Oberteil, Außenansicht aus EN-GJS-400-15-U, Gewicht 18,9 t, Abmessungen 3,8 x 2,6 x 1,7 mm (Bild: Römheld & Moelle, Mainz)



Bild 216: Gasturbinen-Verdichtergehäuse, Unterteil, Innenansicht aus EN-GJS-400-15-U, Gewicht 18,9 t, Abmessungen 3,8 x 2,6 x 1,7 m (Bild: Römheld & Moelle, Mainz)

Technische Lieferbedingungen

Allgemeines	DIN EN 1559-1: Gießereiwesen – Technische Lieferbedingungen – Teil 1: Allgemeines
Gusseisen	DIN EN 1559-3: Gießereiwesen – Technische Lieferbedingungen – Teil 3: Zusätzliche Anforderungen an Eisgussstücke

Toleranzen

Allgemein, für Neukonstruktionen	DIN ISO 8062: Gussstücke – System für Maßtoleranzen und Bearbeitungszugaben (in Überarbeitung)
Allgemeines	DIN 1680-1: Gussrohrtile; Allgemeintoleranzen und Bearbeitungszugaben, Allgemeines
Toleranzsystem	DIN 1680-2: Gussrohrtile; Allgemeintoleranz-System
Gusseisen mit Kugelgraphit	DIN 1685-1: Gussrohrtile aus Gusseisen mit Kugelgraphit – Allgemeintoleranzen, Bearbeitungszugaben (Nicht für Neukonstruktionen!)

Das allgemeine System für Toleranzgrade und Grade für erforderliche Bearbeitungszugaben für die Maße von Gussstücken (für Neukonstruktionen) definiert die Internationale Norm **DIN ISO 8062 (Tabelle Mitte)**.

Für bestehende Konstruktionen aus Gusswerkstoffen können die Normen der Reihe **DIN 1683 bis DIN 1688** zusammen mit dem allgemeinen Teil der **DIN 1680-1** angewendet werden (**Tabelle unten**).

Allgemeine Prüfverfahren

Zugversuch (RT)	ISO 6892, DIN EN 10002-12
Zugversuch (HT)	ISO 783, DIN EN 10002-5
Brinellhärte	DIN EN ISO 6506-1
Vickershärte	DIN EN ISO 6507-1
Rockwellhärte	DIN EN ISO 6507-1
Härte-Umwertung	ISO 4964, DIN 50150
Kerbschlagarbeit (Chapy-V)	ISO 148, DIN EN 10045-1, DIN 50115
Umlaufbiegeversuch	DIN 50113
Zeitstandversuch Zug	DIN EN 10291
Innendruckversuch	DIN 50104

Spezielle Prüfverfahren

Inhalt	Norm
Mikrostruktur	DIN EN ISO 945: Gusseisen - Bestimmung der Mikrostruktur von Graphit
Oberfläche	DIN EN 1370: Gießereiwesen - Prüfung der Oberflächenrauheit mit Hilfe von Vergleichsmustern
Magnetpulverprüfung	DIN EN 1369: Gießereiwesen – Magnetpulverprüfung
Eindringprüfung	DIN EN 1371-1: Gießereiwesen - Eindringprüfung - Teil 1: Sand-, Schwerkraftkokillen- und Niederdruckkokillen-Gussstücke
Ultraschallprüfung	DIN EN 12680-3: Gießereiwesen - Ultraschallprüfung - Teil 3: Gussstücke aus Gusseisen mit Kugelgraphit
Durchstrahlungsprüfung	DIN EN 12681: Gießereiwesen – Durchstrahlungsprüfung VDG-Merkblatt P 541



Bild 217: Zwei bearbeitete Palettentische aus EN-GJS-500-7 der Abmessungen 1040 x 1040 mm und Stranggussabschnitte im Hintergrund (Bild: Gontermann-Peipers, Siegen)



Bild 218: Kunstgussplastik „alltags“ von Gottfried Bräunling aus GJS (Bild: Hegerguss, Enkenbach-Alsenborn)

Schrifttum

- [1] DRP, Aktz. G 98 710 VI/18b, 28.9.1939.
- [2] Piwowarsky, E.: Hochwertiges Gusseisen. Springer-Verlag, Berlin/Göttingen/Heidelberg 1953.
- [3] Donoho, C. K.: Iron Age 24 (1949) Febr., S. 97.
- [4] International Standard ISO 17804.
- [5] Werning, H., u. a.: konstruieren + giessen 25 (2000) H. 2, S. 1 - 82.
- [6] Steller, I.: konstruieren + giessen 28 (2003) H. 2, S. 22 - 24.
- [7] Röhrig, K.: konstruieren + giessen 28 (2003) H. 1, S. 2 - 14.
- [8] Kallen, W., u. K. Röhrig: konstruieren + giessen 26 (2001) H. 4, S. 17 - 39.
- [9] Röhrig, K.: konstruieren + giessen 28 (2003) H. 3, S. 31 - 32.
- [10] Röhrig, K.: konstruieren + giessen 29 (2004) H. 2, S. 2 - 33.
- [11] Röhrig, K.: konstruieren + giessen 24 (1999) H. 1, S. 4 - 74.
- [12] Herfurth, K.: konstruieren + giessen 32 (2007) H.1, S. 2 - 13.
- [13] Herfurth, K., N. Ketscher u. M. Köhler: Giessereitechnik kompakt. Giesserei-Verlag, Düsseldorf 2003.
- [14] Kirgin, K.: Engineered Casting Solutions 8 (2006) H. 5, S. 37 - 42.
- [15] Statistik DGV, Düsseldorf 2007.
- [16] Lux, B.: Giessereiforschung 22 (1970) H. 2, S. 1 - 14 und H. 4, S. 1 - 18.
- [17] Herfurth, K.: Dissertation, Fakultät für Bergbau und Hüttenwesen, Bergakademie Freiberg, 1963.
- [18] Herfurth, K., u. E. Ziegler: Gießereitechnik 24 (1978) H. 6, S. 171 - 175.
- [19] Herfurth, K.: Giesserei-Rundschau 51 (2004) H. 3/4, S. 61 - 63.
- [20] Reek, R.: Topologieoptimierung eines Pressenständers, 2. Fassung, Institut für Gießereitechnik GmbH, Düsseldorf 2002.
- [21] VDG-Merkblatt K 200, Düsseldorf 2005.
- [22] ASME: Boiler and Pressure Vessel Code, 2001.
- [23] Europäische Druckgeräte-Richtlinie 97/23/EC, 1997.
- [24] Steller, I.: Europäische Druckgeräte-Richtlinie – Konsequenzen für Gießereibetriebe. Giesserei 89 (2002) H. 5, S. 83 - 86.
- [25] AD-Merkblätter, Verband der Technischen Überwachungs-Vereine e.V. (VdTÜV), 2000.
- [26] FKM-Richtlinie, Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile aus Stahl-, Eisen- und Aluminiumwerkstoffen, VDMA-Verlag 2002, 4. erweiterte Ausgabe.
- [27] FKM-Richtlinie, Bruchmechanischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile, VDMA-Verlag 2001.
- [28] Hänel, B.: konstruieren + gießen 21 (1996) H. 3, S. 30 - 39.
- [29] Schmidt, Th.: konstruieren + gießen 28 (2003) H. 1, S. 15 - 21.
- [30] Kaufmann, H.: Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit LBF, Darmstadt, Bericht-Nr. FB 214, LBF, Darmstadt 1998.
- [31] Kaufmann, H. u. a.: Leitlinie zur Bewertung von Einflussgrößen auf zyklisch beanspruchte Eisen- gussbauteile, Teil 1: Betriebsfestigkeit (Entwurf), VDG-Fachausschuss „Konstruieren in Guss“.
- [32] Regulations for the Certification of Wind Energy Conversion Systems, Germanischer Lloyd, 1999.
- [33] Gundehus, H., u. H. Zenner: Leitfaden für eine Betriebsfestigkeitsrechnung. Verlag Stahleisen GmbH, Düsseldorf 1999.
- [34] Herfurth, K.: konstruieren + giessen 30 (2005) H. 3, S. 2 - 17.
- [35] Rapid Prototyping und Rapid Tooling im Feinguss. konstruieren + giessen 30 (2005) H. 1 (diverse Veröffentlichungen).
- [36] Feingießen - Verfahren, Werkstoffe, Eigenschaften. Sonderdruck, ZGV Düsseldorf.
- [37] unveröffentlichtes Manuskript. BoschRexroth, Lohr.
- [38] Prospekte BoschRexroth, Lohr.
- [39] Kraft, K.: Urformen. Verlag Technik Berlin 1982.
- [40] konstruieren + giessen 1 (1976) H. 4, S. 28 - 30.
- [41] Fussenegger, F., u. a.: konstruieren + giessen 23 (1998) H. 2, S. 14 - 19.
- [42] Ishorst, B.: konstruieren + giessen 31 (2006) Nr. 2, S. 27 - 28.
- [43] Polzin, H.: konstruieren + giessen 27 (2002) H. 4, S. 15 - 19.
- [44] Weis, W.: Giess. Rundschau 30 (1983) Nr. 6, S. 12 - 14 u. 19 - 30.
- [45] Swager, W. L., u. a.: Trans. Am. Foundrymen's Soc. 90 (1982) S. 811 - 819.
- [46] Hasse, S.: Duktiles Gusseisen. Schiele & Schön, Berlin 1996.
- [47] Thielemann, T.: Gießereitechnik 16 (1970) Nr. 1, S. 16 - 24.
- [48] Herfurth, K.: Gießereitechnik 10 (1964) Nr. 11, S. 371 - 374.
- [49] Heine, R. W.: Giess.-Prax. (1990) H. 8, S. 123 - 129.
- [50] Piwowarsky, E.: Die Neue Gießerei, Techn. wiss. Beih. 1 (1949) Nr. 1, S. 23 - 31.
- [51] Skaland, T.: Dr.-Ing. Diss. Univ. Trondheim 1992-33.
- [52] Wehling, Rembs, Lampic: Giesserei (demnächst).
- [53] Ebner, J., R. Hummer und R. Schlüsselberger: Giesserei 84 (1997) H. 12, S. 40 u. 43 - 48.
- [54] Walz, M.: Diplomarbeit, Inst. f. Metallurgie, TU Clausthal, Aug. 2002.
- [55] Hummer, R.: Giess.-Prax. (1989) H. 9/10, S. 142 - 152.
- [56] Koch, H., u. K. Herfurth: Neue Hütte 19 (1974) H. 12, S. 730 - 734.
- [57] Herfurth, K.: Giesserei-Praxis (2003) H. 3, S. 99 - 106.
- [58] Shinohara, H., u. a.: J. of the Japan Foundry Engineering Soc. 78 (2006) H. 9, S. 464 - 469.
- [59] Solcev, L. A., u. A. A. Pavljucenko: Gießereitechnik 27 (1981) H. 3, S. 73 - 75.
- [60] Herfurth, K.: Giesserei-Praxis (2003) H. 4, S. 137 - 142.
- [61] Wolters, D. B.: konstruieren + giessen 14 (1989) Nr. 1, S. 11 - 37. (Sonderdruck in ZGV erhältlich)
- [62] Herfurth, K., u. N. Ketscher: Gießereitechnik 20 (1974) H. 5, S. 155 - 161.
- [63] Herfurth, K., u. N. Ketscher: Freiburger Forschungshefte B178 (1975) S. 23 - 52.
- [64] Motz, J. M.: Gießerei, technisch-wiss. Beihefte (1957) Nr. 18, S. 943 - 953.
- [65] Jonuleit, M., K. Herfurth u. H.-U. Pasewald: Gießereitechnik 23 (1977) H. 2, S. 35 - 38.
- [66] Jonuleit, M., K. Herfurth u. H.-U. Pasewald: Gießereitechnik 23 (1977) H. 6, S. 163 - 166.
- [67] Röhrig, K., u. W. Fairhurst: Wärmebehandlung von Gusseisen mit Kugelgraphit-ZTU-Schaubilder Gießerei-Verlag GmbH Düsseldorf 1979.
- [68] Voigt, R. C., u. C. R. Loper jr.: AFS Trans. 90 (1982) S. 239 - 255.
- [69] Jonuleit, M., K. Herfurth u. F. Tranta: Freiburger Forschungsheft B 184 (1975) S. 107 - 124.
- [70] Hoedtko, G.: VDI-Z. 133 (1991) Spec. VI, Nov., S. 56 - 58.
- [71] Papaphilippou, C., u. M. Jeandin: J. of Mater. Sci. Lett. 15 (1996) H. 12, S. 1064 - 1066.
- [72] Roy, A., u. I. Manna: Indian Foundry J. 43 (1997) H. 2, S. 13 - 22.
- [73] MTV Metallveredlung, Solingen, Firmenprospekt.
- [74] Grum, J., u. R. Sturm: Mater. Characterization 37 (1996) H. 2/3, S. 81 - 88.
- [75] Tsujikawa, M., u. a.: Trans. of the Jap. Foundrymen Soc. 14 (1995) Dez., S. 65 - 68.
- [76] Jingjie, G., u. a.: Cast Metals 4 (1992) H. 4, S. 233 - 236.
- [77] Gottschalk, U., u. K. Herfurth: Fertigungstechnik und Betrieb 30 (1980) H. 10, S. 603 - 607.
- [78] Jacob-Gilgen, E.: Technica (1970) H. 11, S. 957 - 970.
- [79] Herfurth, K., u. a.: Fertigungstechnik und Betrieb 29 (1979) H. 11, S. 686 - 689.
- [80] Heuler, P., M. Hück u. H. Walter: konstruieren + giessen 17 (1992) H. 3, S. 15 - 27.
- [81] Sonsino, C. M., H. Kaufmann u. A. Engels: konstruieren + giessen 24 (1999) H. 4, S. 4 - 16.
- [82] Hirsch, T., u. P. Mayr: konstruieren + giessen 18 (1993) H. 2, S. 25 - 32.
- [83] konstruieren + giessen 3 (1978) H. 3, S. 32.
- [84] Motz, J. M.: Giesserei 69 (1982) H. 22, S. 633 - 641.
- [85] ISO/TR 15608:2000.
- [86] EN 1011-8: 02.2005.
- [87] Ruge, J.: Schweißen und Löten von Gusseisen mit Kugelgraphit. Deutscher Verlag für Schweißtechnik, Düsseldorf 1960, S. 59 - 63.
- [88] Pahl, E.: konstruieren + giessen 2 (1977) N. 1, S. 3 - 10.
- [89] Schweißen von Sphäroguss. Intern. Nickel Deutschland, Düsseldorf 1969.
- [90] DIN EN ISO 1071:2003.
- [91] Kosfeld, G.: Giesserei 69 (1982) H.5, S. 112 - 119.
- [92] Schock, D.: Giesserei 69 (1982) H. 5, S. 125 - 127.
- [93] Matting, A. u. K. Seifert: Schweißen und Schneiden 20 (1968) H. 6, S. 266 - 269.
- [94] Tölke, P.: Giesserei 69 (1982) H. 5, S. 119 - 125.
- [95] VDG-Merkblatt N 70, 1970.
- [96] prEN 287-3: Prüfung von Schweißern für das Schmelzschweißen von Gusseisen.
- [97] E. Hoffmann, K. Mazac u. P. Tölke: Vortrag, gehalten auf der 8. DVSDVDG-Sondertagung „Sicherung der Güte von Schweißverbindungen“, Hannover 26./27.04.2001.
- [98] Tölke, P.: Giesserei 92 (2005) H. 4, S. 86 - 89.
- [99] Die Verfahren der Schweißtechnik. Fachbuchreihe Schweißtechnik, Band 55, Deutscher Verlag für Schweißtechnik (DVS) GmbH, Düsseldorf.
- [100] Kleinkröger, W., u. M. Sapahpour: Tagungsband zur 4. Sondertagung „Schweißen im Schiffbau und Ingenieurbau“, Hamburg am 2./3. April 2003.
- [101] Christianus, D., u. K. Herfurth: Prüfung der Oberflächenrauheit mit Hilfe von Vergleichsmustern - DIN EN 1370. Sonderdruck ZGV, Düsseldorf.
- [102] Bauer, W.: konstruieren + giessen 26 (2001) H. 4, S. 4 - 15.
- [103] C. Bartels: Gießerei-Praxis, (2006) H. 5, S. 139 - 142.
- [104] Sonsino, C. M., u. a.: Giessereiforschung 57 (2005) H. 4, S. 26 - 32.
- [105] Austempered Ductile Iron Database“, ASME Gear Research Institute, Final Report, June 1989.
- [106] Brandenberg, K., u. a.: Austempered Gears and Shafts: Tough Solutions, Applied Process Inc. Technologies Div.-Livonia, Michigan, USA, 2001.
- [107] Gundlach, R. B., u. J. F. Janowak: Gießerei-Praxis (1987) H. 11, S. 171 - 177.
- [108] Schmidt, I., u. A. Schubert: konstruieren + giessen, 13 (1988) H. 3, S. 18 - 23.
- [109] Motz, J. M., u. E. Kress: konstruieren + giessen, 10 (1985) H. 2, S. 4 - 11.
- [110] Keough, John R., u. K. L. Hayrynen: Carbide Austempered Ductile Iron (CAD), Applied Process Inc. Technologies Div. Livonia, Michigan, USA, Nov. 2000.
- [111] Röhrig, K.: konstruieren + giessen, 28 (2003) H. 1, S. 2 - 14.
- [112] Giesserei 92 (2005) H.12, S. 46.
- [113] Gilbert, G. N. J.: BCIRA 7 (1959) H. 10, S. 478 - 566.
- [114] Gilbert, G. N. J.: Foundry Trade Journal (1964) S. 35 - 45.
- [115] Röhrig, K.: konstruieren + giessen 9 (1984) H. 3, S. 4 - 21.
- [116] Röhrig, K.: konstruieren + giessen 3 (1978) H. 4, S. 3 - 16.
- [117] Reifferscheid, K. J., u. H. Träger: Gießerei Techn.-Wiss. Beihefte 15 81963) S. 99 - 105.
- [118] Nechtelberger, E.: Eigenschaften unlegierter und niedrig legierter Gusseisen mit Lamellen-graphit/Kugelgraphit/Vermiculargraphit im Temperaturbereich bis 500 °C. Fachverlag Schiele & Schön, Berlin 1977.
- [119] Löhe, D. O. Vöhringer u. E. Macherauch: Giesserei-Forschung 36 (1984) H. 2, S. 43 - 52.
- [120] Angus, H. T.: Brit. Foundryman (1966) S. 407 - 431.
- [121] Mayer, H.: VDI-Berichte Nr. 469, S. 11 - 22, Düsseldorf 1983.
- [122] Reifferscheid, K.: Gießerei-Praxis (1978) H. 19, S. 291 - 294.
- [123] Baker, S. G., u. J. A. Pope: the Brit. Shippbuilding Res. Ass. Report No. 363. London 1961.
- [124] Röhrig, K.: VDI-Z 127 (1985) Nr. 5, S. S27 bis S38.
- [125] Forschungsbericht E-103. Institut für Gießereitechnik, Düsseldorf 1979, S. 70 - 71.
- [126] Siefer, W., u. K. Orths: Giesserei-Forschung 33 (1981) H. 3, S. 109 - 118.
- [127] Siefer, W.: Gießerei-Forschung 37 (1985) H. 1, S. 17 - 28.
- [128] Löhe, D., O. Vöhringer u. E. Machrauch: Gießerei-Forschung 37 (1985) H. 3, S. 103 - 111.

- [129] Löhe, D., O. Vöhringer u. E. Machrauch: Gießerei-Forschung 38 (1986) H. 1, S. 21 - 31. he Brit. Shipbuilding Res. Ass. Report No. 363, London 1961. in: Gießerei-Forschung 37 (1985) H. 3, S. 103 - 111.
- [130] Dorazil, A., u. a.: Gießerei-Praxis (1985) H. 9/10, S. 109 - 123.
- [131] Werner H., u. H. Werning: konstruieren + giessen 23 (1998) H. 1, S. 4 - 7.
- [132] Sugestions for ductile iron production no 68. Rio Tinto & Titanium Inc., Montreal.
- [133] Ductile iron. Data for design engineers. Rio Tinto & Titanium Inc., Montreal, 1998.
- [134] Pers. Mitteilung von Torbjörn Skaland, Vesta Castings, Kristiansand, März 2007.
- [135] Röhrig, K.: Verschleißbeständige Gusswerkstoffe auf Eisenbasis. DGM-Symposium „Metallkundliche Aspekte des Verschleißes“. Bad Pyrmont 25. und 26. 10. 1979.
- [136] konstruieren + giessen 13 (1988) H. 2, S. 4 - 12.
- [137] Stauffer, W. A.: Schweizer Archiv 24 (1958) S. 218 - 230 u. 248 - 263.
- [138] Prospekt der KSB AG.
- [139] Wilson, F., und T. S. Eyre: Metals and Materials (1969) H. 3, S. 86 - 91.
- [140] Stähli, G.: Gießerei 52 (1965) H. 13, S. 406 - 410.
- [141] Reifferscheidt, K. J.: MTZ 23 (1962) H. 4, S. 108 - 113.
- [142] Röhrig, K.: Gießerei-Praxis (1983) H. 1/2, S. 1 - 16.
- [143] Mayr, P., H. Vettters und J. Walla: Gießerei-Forschung 38 (1986) H. 3, S. 86 - 98.
- [144] Hauke, W., und K. Hornung: IHTM 38 (1983) S. 72 - 77.
- [145] Mannes, W., K. Hornung und H. Rettig: konstruieren + gießen 11 (1986) H. 4, S. 19 - 29.
- [146] Opitz, H., u. K. Feitkamp: Gießerei 54 (1967) H. 23, S. 618 - 620.
- [147] Katz, W.: Gießen für die Chemie. Sonderdruck ZGV 1970.
- [148] A guide to the corrosion resistance of cast iron. BCIRA Broadsheet 118-2.
- [149] The corrosion of cast iron. BCIRA J. 6 (1955/56) S. 165 - 177.
- [150] Palmer, K. B.: BCIRA J. 29 (1981) S. 443 - 449.
- [151] von Plessen, H., und H. Vogt: Werkstofftechnik 14 (1983) S. 141 - 147.
- [152] Fonderie/Fondeur d'aujourd'hui (1982) Nr. 61, S. 19.
- [153] Okorapor, O. E., und C. R. Loper Jr.: Gießerei-Praxis (1980) H. 11, S. 164 - 167.
- [154] Tauscher, H., und I. Lenk: IFL-Mitteilungen 15 (1976) H. 7/8, S. 289 - 294.
- [155] Palmer, K. B.: Corrosion fatigue properties of gray and nodular graphite cast irons. Proc. Quality Control of Engineering Alloys and the Role of Metal Science. Intern. Symposium, Delft (NL) 1997, S. 271 - 288.
- [156] Fischer, E., F. Mahning und H. Walter: konstruieren + giessen 13 (1988) H. 2, S. 16 - 24.
- [157] Pusch, G.: konstruieren + giessen 17 (1992) H. 3, S. 29 - 35 und H. 4, S. 4 - 12 sowie 18 (1993) H. 1, S. 4 - 11 und H. 2, S. 4 - 10.
- [158] Pusch, G.: konstruieren + giessen 23 (1998) H. 2, S. 20 - 28.
- [159] BAM-GGR007: Leitlinie zur Verwendung von Gusseisen mit Kugelgraphit für Transport- und Lagerbehälter für radioaktive Stoffe. Rev. O. Juni 2002 Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung.
- [160] Regelwerk Germanischer Lloyd: WindEnergie GmbH. Richtlinie vom 1. November 2003.
- [161] Hübner, P.-V., u. a.: konstruieren + giessen 29 (2004) H. 3, S. 16 - 20.
- [162] Zerbst, U., u. P. Hübner: DVS-Merkblatt 2401 in Schweißverbindungen. Fachbuchreihe Schweißtechnik Band 101. DVS-Verlag GmbH, Düsseldorf 2004.
- [163] DIN EN ISO 12737:1999.
- [164] ESIS P2-92: ESIS (European Structure Integrity Society) Procedure for Determining the Fracture Behaviour of Metallic Materials.
- [165] ISO 12135:2002.
- [166] Berger, C.: In: BAM-Seminar „Behälter aus Sphäroguss für radioaktive Stoffe“, Berlin Juni 1987, DVM-Berichtsband, S. 181 - 197.
- [167] Wolfensberger, S.: Dr.-Ing.-Diss., ETH Zürich 1986.
- [168] Stroppe, H., G. Pusch u. A. Ludwig: Gießereiforschung 54 (2002) H. 4, S. 115 - 120. auch: konstruieren + giessen 29 (2004) H. 4, S. 19 - 23.
- [169] Forschungsbericht E-316 zum AiF-Forschungsvorhaben Nr. 13507/N1. Institut für Gießereitechnik, Düsseldorf 2005.
- [170] Baer, W., G. Pusch u. T. Brecht: Giesserei 83 (1996) H. 22, S. 19 - 22.
- [171] Pusch, G., u. W. Baer: Giessereiforschung 45 (1993) H. 1, S. 1 - 8.
- [172] ASTM E 647-86: Method for Constant-Load-Amplitude Fatigue Crack Growth Rates Above 10^9 m/cycle.
- [173] Pusch, G., P. Hübner u. O. Liesenberg: DVM-Bericht 234 „Fortschritte der Bruch- und Schädigungsmechanik“, Freiberg 2002.
- [174] Pusch, G., B. Komber u. O. Liesenberg: konstruieren + giessen 21 (1996) H. 2, S. 49 - 54.
- [175] Lang, K.-H.: Dr.-Ing. Diss., Universität Karlsruhe 1985.
- [176] NASGRO (2000): Fatigue crack growth computer program << NASGRO >>, Version 3, NASA, L. B. Johnson Space Centre, Houston, Texas. JSC-22267B.
- [177] ASTM E 1820-01, Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness, ASTM, 2001.
- [178] BS7448-3, Fracture Mechanics Toughness Tests, Part 3 - Method for Determination of fracture toughness of metallic materials at rates of increase in stress intensity factor greater than 3.0 MPa $\sqrt{m/s}$ British Standard Institution 2005.
- [179] Draft 25. European Structural Integrity Society [ESIS], Technical Sub-Committee on Dynamic Testing at Intermediate Strain Rates. December 2005.
- [180] Pusch, G., A. Udoth u. S. Winkler: Materialprüfung 39 (1997) H. 11/12, S. 460 - 463.
- [181] Baer, W.: Materialprüfung 47 (2005) H. 11/12, S. 666 - 673.
- [182] Pusch, G., A. Udoth u. W. Baer: konstruieren + giessen 22 (1997) H. 2, S. 12 - 16.
- [183] Pusch, G., A. Udoth u. W. Baer: konstruieren + giessen 24 (1999) H. 3, S. 25 - 28.
- [184] Motz, J. M.: Giessereiforschung 40 (1988) H. 4, S. 117 - 128.
- [185] Moulin, D., T. Yuritzinn u. G. Sert: RAMTRANS 6 (1995) H. 2/3, S. 145 - 148.
- [186] Kobayashi, T., H. Yamamoto u. K. Matsuo: Eng. Fract. Mech. 30 (1988) H. 3, S. 397 - 407.
- [187] Frenz, H., u. a.: Effect of Sample Size and Loading Rate on the Fracture Toughness of Ductile Cast Iron. In: Proc. Int. Conf. On Mechanical Behavior of Ductile Cast Iron and other Cast Metals, Kitakyushu, August 1993, S. 449 - 454.
- [188] Salzbrenner, R., u. T. B. Crenshaw: Effect of Sample Size and Loading Rate on the Transition Behavior of a DI Alloy. In: Proc. 23rd National Symp. On Fracture Mechanics, June 1991, College Station.
- [189] Gillot, R.: Techn.-wiss. Berichte MPA Stuttgart (1988) Nr. 88-03.
- [190] Rosenfield, A. R., u. a.: Nuclear Engineering and Design 116 (1989) S. 161 - 170.
- [191] Kußmaul, K., u. a.: BAM-Seminar „Behälter aus Sphäroguss für radioaktive Stoffe“, Berlin 1987. DVM-Berichtsband. S. 139 - 180.
- [192] Enderlein, M., u. a.: 36. Tagung d. DVM-Arbeitskreises „Bruchvorgänge“, Köln, Febr. 2004. in: DVM-Bericht Nr. 236, S. 251 - 260.
- [193] Müller, K., u. a.: Wie [200], S. 225 - 238.
- [194] Winkler, H.-P., u. a.: DYNAMIC FRACTURE TOUGHNESS DATA FOR CASTOR® CASKS. PATRAM 2004, Berlin.
- [195] Fussenegger, F., u. a.: konstruieren + giessen 23 (1998) H. 2, S. 14 - 19.
- [196] Pusch, G., u. W. Baer: Prüfbericht 6/95. TU Bergakademie Freiberg. Institut für Werkstofftechnik, Freiberg 1995.
- [197] Kuna, M., u. a.: konstruieren + giessen 27 (2002) H. 4, S. 27 - 32.
- [198] Mädler, K.: Tagungsband zum CIATF Technical Forum 1999, Düsseldorf, 10. - 11. Juni 1999, S. 440 - 447.
- [199] Hengefeld, F.: Fatigue damage in cast structures. A fracture mechanics assesment. Graduation report. Hogeschool Enschede, 1998.
- [200] Buxbaum, O.: Betriebsfestigkeit - Sichere und wirtschaftliche Bemessungschwingbruchge-
- fährdeter Bauteile. Stahleisen GmbH 1992, 2. erweiterte Auflage.
- [201] Haibach, E.: Betriebsfestigkeit - Verfahren und Daten zur Bauteilberechnung. Springer-VDI Verlag 2006, 3. Auflage.
- [202] Sonsino, C. M.: 27. Tagung des DVM-Arbeitskreises Betriebsfestigkeit in Tagungsband S. 21 - 38.
- [203] Sonsino, C. M.: Konstruktion 57 (2005) H. 4, S. 87 - 93.
- [204] Sonsino, C. M., u. V. Grubisic: VDI-Berichte (1995) Nr. 1173, S. 159 - 190.
- [205] Stets, W., u. A. Sobota: Giesserei 93 (2006) H. 4, S. 26 - 46.
- [206] Kaufmann, H., u. D. B. Wolters: konstruieren + gießen 27 (2002), Nr. 1, S. 4 - 27.
- [207] Sonsino, C. M., H. Kaufmann u. A. Engels: Giessereiforschung 42 (1990) H. 3, S. 110 - 121.
- [208] Sonsino, C. M.: Konstruktion 45 (1993) H. 1, S. 25 - 33.
- [209] Kloos, K. H., u. a.: VDI-Berichte Nr. 354 (1979), S. 59 - 72.
- [210] Sonsino, C. M., u. V. Grubišic: Konstruktion 37 (1985) H. 7, S. 261 - 269.
- [211] Neugebauer, J.: Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit LBF, Darmstadt; Bericht Nr. FB-175 (1986).
- [212] Müller, A.: Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit LBF, Darmstadt; Bericht Nr. FB-203 (1994).
- [213] Kaufmann, H.: konstruieren + gießen 24 (1999) H. 2, S. 37-40.
- [214] Sonsino, C. M., u. a.: Giessereiforschung 57 (2005) H. 4, S. 26 - 32.
- [215] Zinke, R., u. a.: Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit LBF, Darmstadt; Bericht Nr. FB-229 (2006).
- [216] Sonsino, C. M.: Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit LBF, Darmstadt, Technische Mitteilungen TM-Nr. 111 (1997).
- [217] Filippi, M., u. K. Dieterich: Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit LBF, Darmstadt; Technische Mitteilungen TM-Nr. 111 (1997).
- [218] Klätschke, H., u. D. Schütz: Materialwissenschaft und Werkstofftechnik 26 (1995), H. 8, S. 404 - 415.
- [219] Farby, J. F.: Diss. RWTH Aachen 1984.
- [220] Drobniewski, J., u. W. Vötsch: konstruieren + giessen 26 (2001) H. 1, S. 32 - 34.
- [221] Staudinger, H. P.: VDI-Z 127 (1985) H. 13, S. 471 - 479 auch: konstruieren + giessen 11 (1986) H. 1, S. 23 - 34.
- [222] Grundmann, H.: Schweißen von Gusseisenwerkstoffen und Stahlguss. Deutscher Verlag für Schweißtechnik, Düsseldorf 1971.
- [223] VDG-Merkblatt K 31, Düsseldorf 1984.
- [224] Staudinger H. P.: SVDI-Z 126 (1984) H. 11, S. 398 - 402.
- [225] Schnittdaten-Handbücher und Kataloge diverser Werkzeughersteller.
- [226] J. Gießler: konstruieren + giessen 26 (2001) H. 1, S. 9 - 10.
- [227] Nickel, O.: konstruieren + giessen 9 (1984) H. 4, S. 4 - 86.
- [228] Röhrig, K.: konstruieren + giessen 18 (1993) H. 3, S. 4 - 29.
- [229] Röhrig, K.: Gießerei-Praxis (2002) H. 4, S. 137 - 143 und H. 5, S. 159 - 171.
- [230] Thieme, J., u. S. Amareller: Walzwerkswalzen. Climax Molybdenum Comp., Zürich 1968.
- [231] Hayrynen, K. L., u. K. R. Brandenburg: Trans. Amer. Foundrym. Soc. 111 (2003) 03-088, S. 845 - 850.
- [232] Rimmer, A.: konstruieren + giessen 32 (2007) H. 1, S. 39 - 41.
- [233] Röhrig, K.: Verschleißbeständige weiße Gusseisenwerkstoffe. Sonderdruck ZGV Düsseldorf. ISO 16112: Gusseisen mit August 2006.
- [234] VDG-Merkblatt W 50: Düsseldorf 2002.
- [235] ASTM-A842-85: Standard Specification for Compacted Graphite Iron Castings, 1997.
- [236] K. Röhrig: Gusseisen mit Vermiculargraphit. Sonderdruck ZGV Düsseldorf
- [237] Weiden, D., von der: Diplomarbeit, TH Darmstadt, Sept. 1984.
- [238] Lampic, M.: konstruieren + giessen, 32 (2007) H. 1, S. 35 - 38.
- [239] VW 50021. Gusswerkstoffe – Bereich Abgasanlage, Werkstoffanforderungen. Volkswagen AG, 2006.



**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