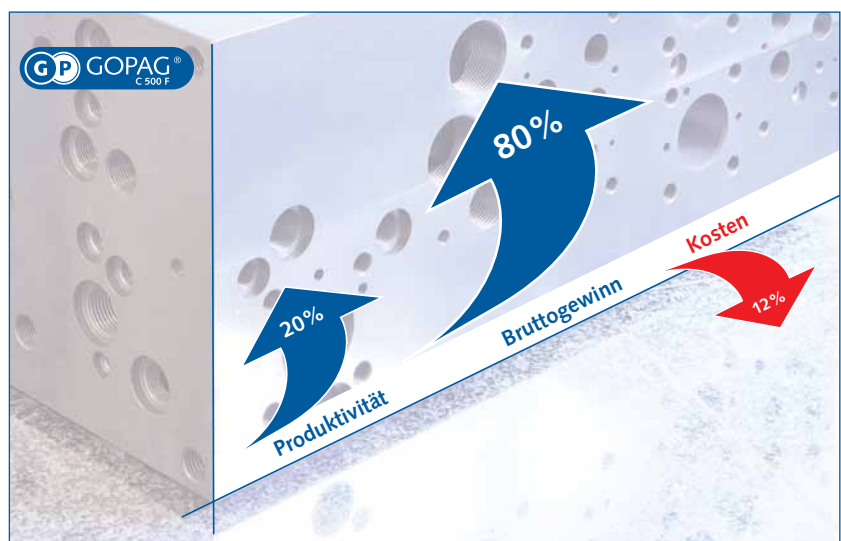
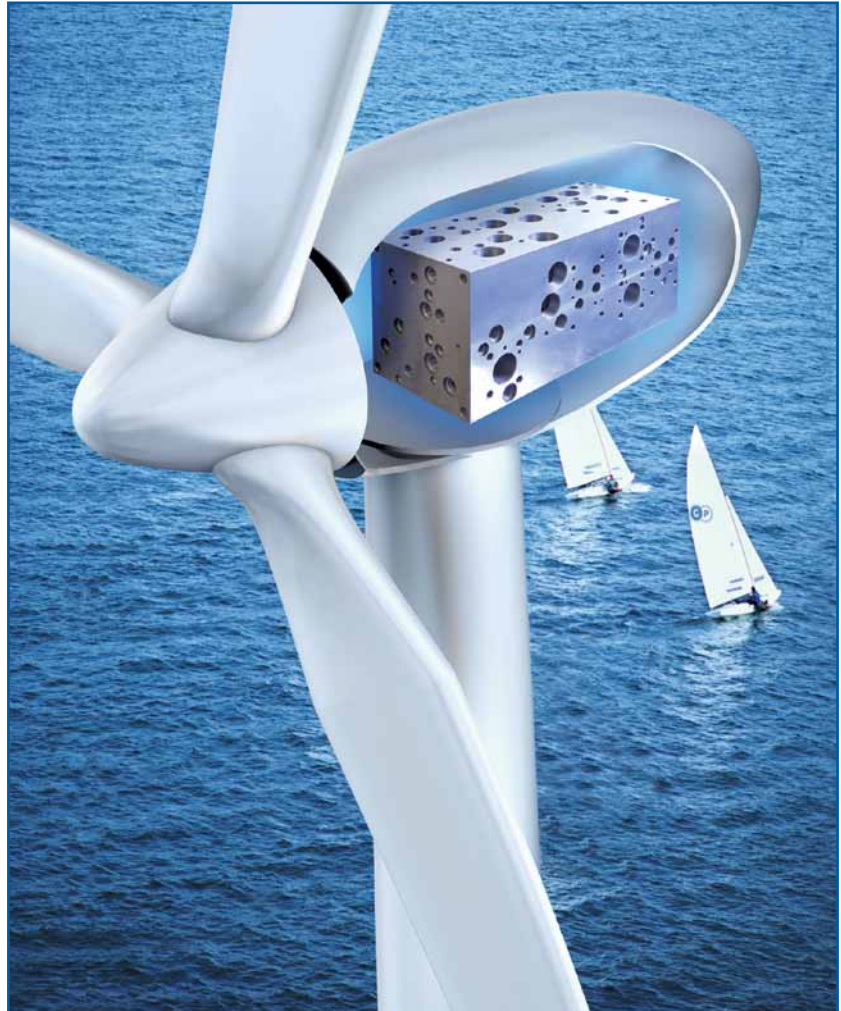


Berstdruckversuche mit Gusseisenwerkstoffen bei niedrigen Temperaturen

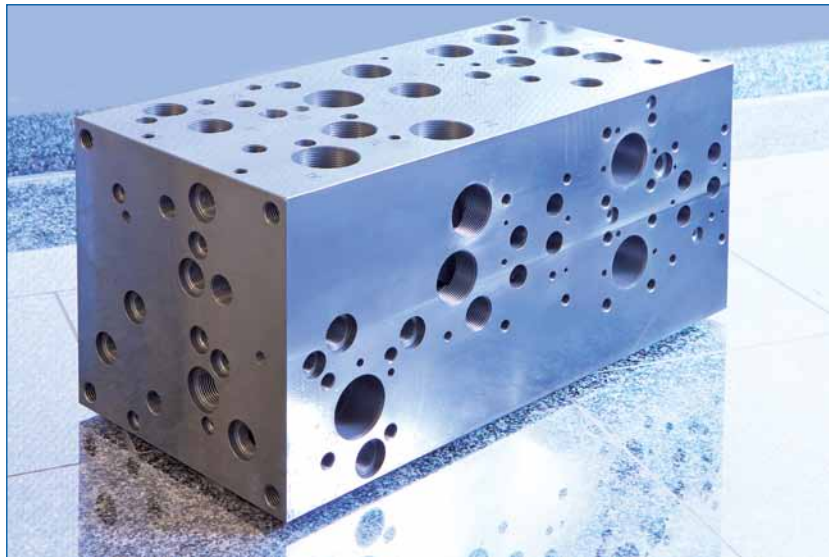
1 Einleitung

Seit langem haben sich unterschiedliche Qualitäten von Gusseisen in der Hydraulik, der Fluidtechnik oder im Maschinenbau bewährt. Mit steigenden Arbeitsdrücken bzw. anderweitig wachsenden Anforderungen, kamen nach GJL-Qualitäten (Grauguss) überwiegend GJS-Werkstoffe (Gusseisen mit Kugelgraphit auch Sphäroguss genannt) und hier meist EN-GJS-400-15 bzw. EN-GJS-400-18 zum Einsatz. Bei deutlich verbesserten Werten für Dehnung, Streckgrenze und Zugfestigkeit werden vom Bearbeiter gegenüber Stählen vor allem die wesentlich höheren Schnittleistungen, sowie deutlich bessere Werkzeugstandzeiten bei der sehr aufwendigen Bearbeitung geschätzt. Für Beanspruchungen, denen ein EN-GJS-400 nicht mehr gewachsen ist und wo u.a. der Gefügestruktur geschuldete Einbußen bei der Dehnung eines EN-GJS-500-7U nicht den vorgesehenen Anwendungen genügen, kommt seit einigen Jahren die „jüngste Generation“ der Gusseisenwerkstoffe, hochsilicierte GJS-Qualitäten, zum Einsatz [1]. Mit mechanischen Eigenschaften, die dem Vergleich mit diversen in Hydraulik und Maschinenbau verwendeten Stählen keinesfalls nachstehen, zeichnen sich diese rein ferritischen Gusseisen zusätzlich durch hervorragende Bearbeitbarkeit bei minimalem Werkzeugverschleiß aus [2]. **Bild 1.** Im stetig wachsenden Bereich der Off-Shore-Anwendungen aber auch im maritimen Bereich wächst das Interesse am Einsatz von hochsilicierten Gusswerkstoffen wie dem GOPAC® C 500 F von Gontermann-Peipers. Vorschriften und Normen der Klassifizierungsgesellschaften, die nur selten Gusseisenwerkstoffe einbeziehen, sowie fehlende Kenntnisse über moderne Gusswerkstoffe allgemein, stehen einem breiten Einsatz derzeit jedoch noch entgegen. Hinzu kommt, dass derzeit wenig über das Verhalten der zweiten Generation von Gusseisenwerkstoffen mit Kugelgraphit bei tiefen Temperaturen bekannt ist.



Kerbschlagwerte für Gusseisenwerkstoffe

Die Kerbschlagarbeit ist ein einfaches Probeverfahren, das vor mehr als 100 Jahren entwickelt wurde. Die Verwendung von kleinen und einfachen Proben und die relativ einfache und schnelle Versuchsdurchführung ermöglichen eine kostengünstige Wertebestimmung. Die EN DIN 1563 fordert für den Werkstoff GJS-400-18U-LT einen Einzelwert bei -20 °C von 7 J und einen Mittelwert bei 3 Prüfungen von 10 J Kerbschlagarbeit bei einer Wandstärke von 60 bis 200 mm als Mindestwerte. Diese Werte sind den meisten Konstrukteuren noch aus Studienzeiten präsent. Stehen sie doch für das weit verbreitete Klischee, welches Gusseisenwerkstoffe generell als sprödes und unter Tieftemperatur nicht zu verwendendes Material einstuft. Viele haben noch die Bilder der gesunkenen Libertyschiffe im zweiten Weltkrieg und andere große Schadensfälle als Abschreckung in Erinnerung. Sprödbrüche von Schweißnähten in kalten Gewässern entwickelten eine hohe Sensibilität der Ingenieure für die Kaltzähigkeit von Werkstoffen. Der in diesem Zusammenhang häufig angewandte Kerbschlagbiegeversuch, der für kaltzähnen Baustahl mind. 27 J bei -20 °C nachweist, deklassierte somit ungerechtfertigt Gusseisen mit den o.g., deutlich niedrigeren Kerbschlagwerten. Die gültige Norm EN DIN 10045 für die Kerbschlagbiegeprobe ändert nichts an dieser allgemeinen Betrachtungsweise. Wenig bekannt ist dagegen die Tatsache, dass sich Ergebnisse der Kerbschlagarbeit nur in einer einheitlichen Werk-



stoffgruppe vergleichen lassen. Somit sind Baustahl und Gusseisen sowie legierte Stahlsorten nicht auf Basis einer identischen Kerbschlagbiegeprobe untereinander zu vergleichen [9]. Da auch die Kerbschlagarbeit keine unmittelbare Anwendung in der Bauteilberechnung zulässt, muss jeder Konstrukteur sich die Frage stellen, welche anderen Prüfungen/Werte er für seine Bauteilauslegung zu berücksichtigen hat [9].

Konzept der Bruchmechanik

Neben der Ermittlung von Festigkeits- und Dehnwerten bietet die Bruchmechanik an dieser Stelle weitere Möglichkeiten. Mit dem Konzept der Bruchmechanik verbindet man zulässige Spannungskomponenten und die Größen von strukturellen Ungängen quantitativ miteinander und drückt damit eine neue Werkstoffeigenschaft, die

Bruchzähigkeit, aus. Diese Werkstoffeigenschaft kennzeichnet, den Widerstand gegen instabiles Risswachstum [8]. Der für den Werkstoff ermittelte Wert der Bruchzähigkeit stellt somit ein wichtiges Kriterium in der Bauteilauslegung dar. Bei der Untersuchung der Werkstoffe GOPAG® und Hyt 60 an der Universität Aachen wurden für beide Werkstoffe identische KIC-Werte ermittelt [1]. Zurzeit laufen weitere Untersuchungen an der TU Bergakademie Freiberg für die Erstellung einer Stranggussnorm, um zukünftig für den Konstrukteur gesicherte Werte zur Verfügung zu stellen. Weitere informative Anhänge für GJS-Werkstoffe finden sich darüber hinaus in der EN DIN 1563 2011. Aber auch praktische Versuche lassen unter Berücksichtigung entsprechender Sicherheitsbeiwerte oft Rückschlüsse auf die Bauteilauslegung zu.

2 Untersuchte Materialien

Im September 2010 zeigte ein bei HYDAC Fluidtechnik durchgeführter Berstdruckversuch (GOPAG® C 500 F im Vergleich zu 11SMnPb30+C), dass der Gusswerkstoff bei Raumtemperatur einem höherem Druck stand hält als der Schnellarbeitsstahl [3]. Der Versuchsaufbau zeigte, dass bei beiden Materialien bei ca. 5.000 bar das Gewinde am Anschluss ausgerissen wurde. Vor diesen Hintergründen entschloss sich Gontermann-Peipers eigene Berstversuche an drei Kugelgraphit-Gusswerkstoffen und einem für den Einsatz in der Hydraulikindustrie optimierten, legierten Schmiedestahles bei Raumtemperatur bei -20 °C sowie bei -40 °C durchzuführen. Verglichen wurden:

- der hochsilicierte GOPAG® C 500 F (Strangguss), ein EN GJS-400-15U (Strangguss),
- der u.a. von der DNV [11] gelistete und zugelassene EN-GJS-400-18 (Kokillenblockguss),
- der HYT 60 (leg. Schmiedestahl).

Während der GOPAG® C 500 F den HYT 60 in Streckgrenze und insbesondere A-Dehnung deutlich übertrifft, liegen die beiden GJS 400-Werkstoffe erwartungsgemäß bei Festigkeit und Härte unter dem GOPAG® und dem Schmiedestahl. Typisch für hochsilicierte Werkstoffe weist der GOPAG® C 500 F ein gegenüber den anderen Werkstoffen deutlich erhöhtes Streckgrenzenverhältnis auf (**Tabelle 1**).

Alle Gontermann-Peipers-Gusswerkstoffe zeigen in der Gefügestruktur ein praktisch rein ferritisches Gefüge mit sauber ausgebildeten und fein verteilten Graphitkugeln, die bei der Bearbeitung hohe Schnittgeschwindigkeiten erlauben und zu minimalen Toleranzen führen. Die im akkreditierten Labor von GP nachgewiesene Struktur des HYT 60 zeigt einen sehr hohen Perlitanteil (**Tabelle 2**). Beim Vergleich anderer untersuchter Proben dieser Schmiedestahlqualität [1, 2, 4] zeigt sich aber generell eine hohe Schwankungsbreite im Gefüge und der Bruchdehnung. Allerdings gibt der Hersteller für diesen Werkstoff auch keine garantierte Bruchdehnung im Werkstoffdatenblatt an.

Mechanische Eigenschaften der untersuchten Werkstoffe

	Probenlage im Block	Zugfestigkeit R_m (Mpa)	Streckgrenze $R_{p0,2}$ (Mpa)	Streckgrenzenverhältnis $R_{p0,2} / R_m$	Bruchdehnung A_5 %	Härte HB
GOPAG® C 500 F	1/4 D	495	385	0,778	17,0	180-181
GJS-400-18U-LT	Außen	377	242	0,641	26,0	123 - 137
GJS-400-15U	1/4 D	402	269	0,670	23,5	142 - 144
HYT 60	Außen	560	345	0,610	6,5	180 - 184

Tabelle 1:

		Grundgefüge			Graphit (nach EN ISO 945)		Entartung
		Ferrit	Perlit	Zementit	Form	Größe	
GOPAG® C 500 F	1/4 D	100 %	0	0	V VI	6 7 (8)	Keine
GJS-400-18U-LT	30 mm von außen	100%	0	0	V VI	5 6 7 8	Keine
GJS-400-15U	1/4 D	98%	2%	0	V' VI	(4) 5' 6	Keine
HYT 60	30 mm von außen	20%	80%	0	-	-	-

Tabelle 2:

3 Versuchsdurchführung

Für die Berstversuche fanden sich bei der MAXIMATOR GmbH in Nordhausen/Harz die geeigneten Einrichtungen. Mit dem Ziel, 6000 bar als Berstdruck nicht zu überschrei-

ten und mangels einer genormten Prüfung oder eines Prüfkörpers für Berstversuche, wurde in Anlehnung an die Zugfestigkeits-Berstdruck Relation nach Boardmen [5] und unter

Berücksichtigung einer optimalen Probenaufnahme, eine zylindrische Probenform mit 3 mm Wandstärke bei $\varnothing a = 14$ mm definiert (siehe Bild 1).

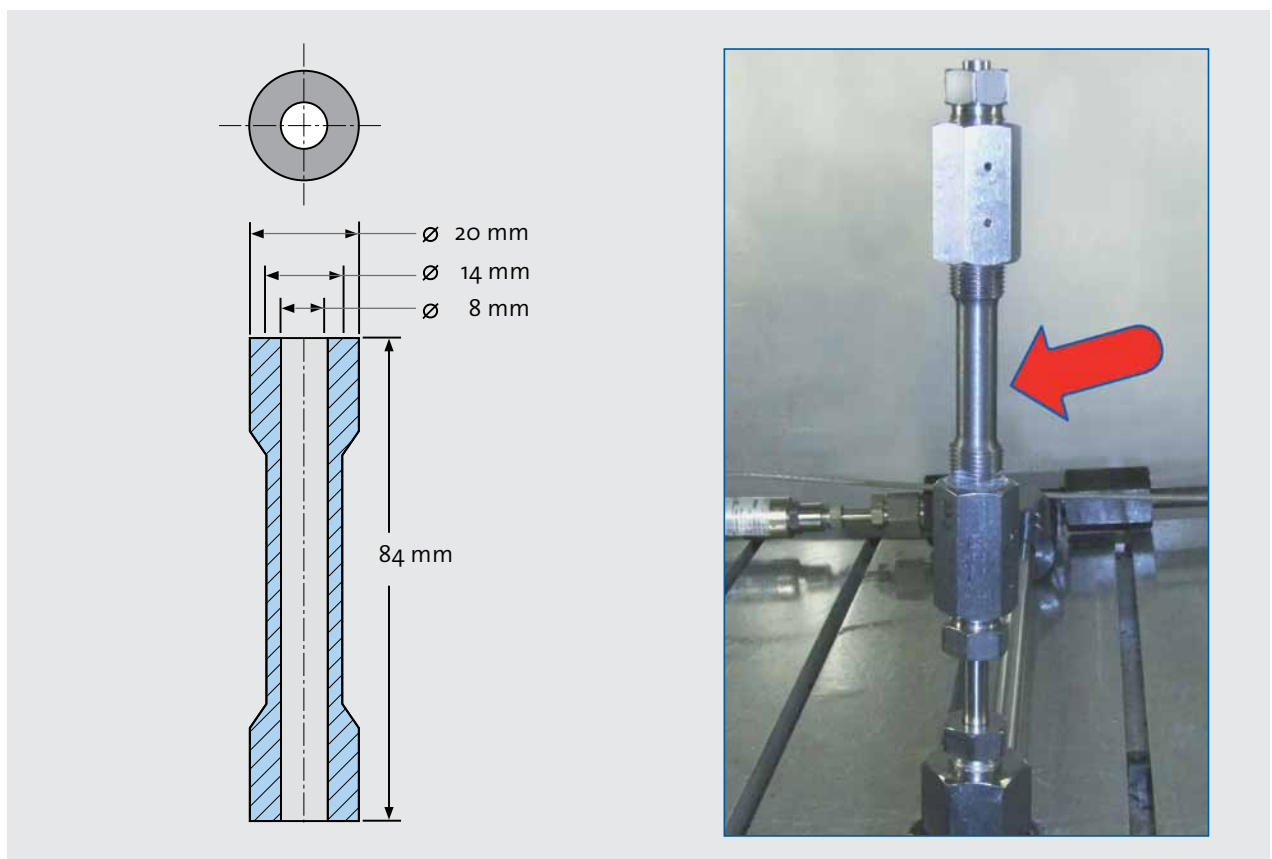


Bild 1

Bild 2

Eine Seite der Probe wurde mit einer Kugel verschlossen. Die Druckeinleitung erfolgte über einen eingepress-

ten Stahlkegel, wobei die notwendige Dichtkraft durch Überwurfmuttern erzeugt wurde. Die Versuchsanordnung

in der **Autofrettageanlage PS 912** ist in den **Bildern 2 und 3** ersichtlich.



Bild 3

Folgende Prüfbedingungen wurden definiert:

Prüfstand:	Autofrettageprüfstand PS 912
Prüftemperatur:	+ 22 °C / -20°C / -40°C
Prüfmedium:	Maxifluid
Messmittel:	Drucksensor Wika 7000 bar, N524700001
Prüfvorgaben	
Druckkurve:	Vordruck: 1000 bar
Druckanstieg:	170 bar/s.

Der Druckanstieg von 170 bar/s sollte eine statische Belastung simulieren. Der Vordruck von 1000 bar diente der Stabilisierung des Systems vor der eigentlichen Belastung.

4 Ergebnisse

Alle drei unterschiedlichen Werkstoffe (GJS 400, GOPAG®, Schmiedestahl) zeigten unter den jeweiligen Prüftemperaturen ein unterschiedliches Berstverhalten. Während der GOPAG® C 500 F, aufgrund des geringen Dehnbereiches oberhalb der Streckgrenze eine sehr geringe bleibende Verformung aufweist

und platzt, weisen die traditionellen, ferritischen GJS- Werkstoffe eine bleibende Deformation vor dem Bersten auf. In Abhängigkeit von der Prüftemperatur verändert sich das Verhalten des HYT 60 deutlich. Wie auch in anderen Versuchen nachgewiesen, [7] kommt es bei allen Werkstoffen zu

einer geringen Veränderung der mechanischen Eigenschaften in Abhängigkeit von der Temperatur, die sich in der Deformation vor dem Bersten darstellt (**Bild 4**). Die GJS 400 Werkstoffe zeigen im Gegensatz zum GOPAG® 500 und dem HYT 60 (hier nur bei -40°C) eine bleibende plastische Verformung.

▼ GOPAG® C 500 F



▼ GJS 400-18U-LT



▼ GJS 400-15U



▼ HYT 60



Bild 4

Die während der Versuche ermittelten Berstdrücke stellen erwartungsgemäß ein Äquivalent zu den vorab

festgestellten Zugfestigkeiten dar. Bis auf den GOPAG® C 500 F weisen alle Materialien einen leichten An-

stieg der Drücke mit sinkender Temperatur auf (Tabelle 3).

Berstdrücke bei verschiedenen Temperaturen

EN-GJS-400-15U			EN-GJS-400-18U-LT			GOPAG® 500 GJS			HYT 60		
22 °C	- 20 °C	- 40 °C	22 °C	- 20 °C	- 40 °C	22 °C	- 20 °C	- 40 °C	22 °C	- 20 °C	- 40 °C
2469	2563	2856	2324	2447	2544	2857	2926	2973	3763	3864	4070
2482	2609	2912	2269	2447	2449	3112	2901	2919	3755	3911	4100
-	2607	2871	2287	2461	2458	2986	2914	3139	-	3636	3963

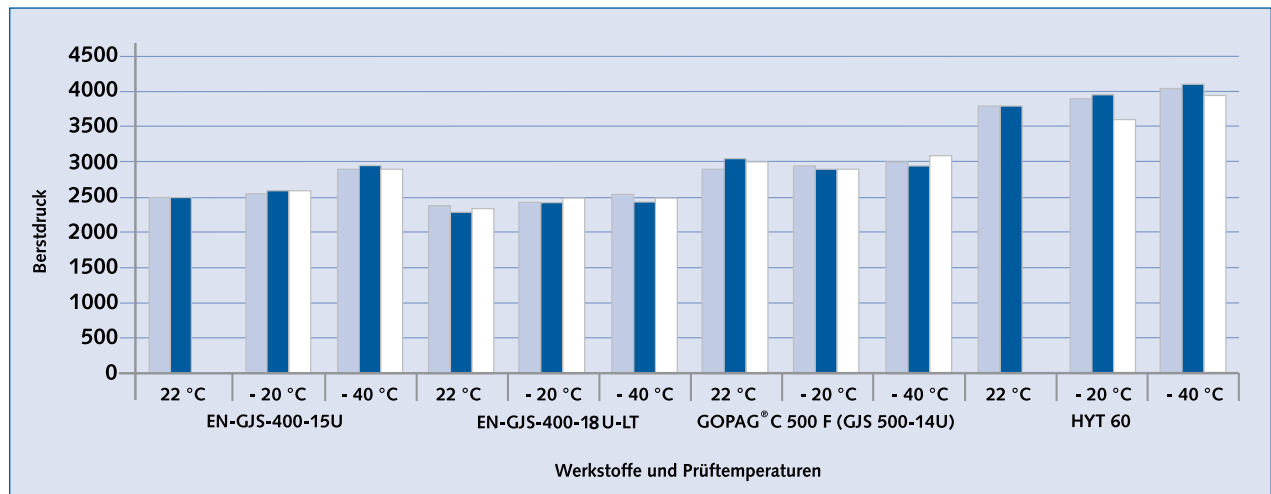


Tabelle 3

2 Ableitungen für die Praxis

In Auswertung der im zweiachsigen (flächigen) Spannungszustand ermittelten Berstdrücke stellte sich die Frage, in wie weit diese unmittelbar in Relation zu den Ergebnissen des Zugversuches mit einachsigen Spannungszustand gesehen werden können. Mit Hilfe einer Berechnung der Zugfestigkeit aus dem Berstdruck nach Boardman [5] ergab sich jedoch für die Gusswerkstoffe eine gute Übereinstimmung mit +17 % bis +19% gegenüber den Werten in **Tabelle 1**. Der Stahl zeigte hier eine Abweichung

von +30%. Als eine wesentliche Ursache für die Abweichungen wurde die geringe Länge des Prüfrohrs angesehen, da für alle Berechnungen mit den genannten Formeln ein unendlich langes Prüfrohr vorausgesetzt wird. In jedem Fall brachten die Ergebnisse nach Boardman im Vergleich zu den Formeln nach Barlow und Lamé [5] die größere Übereinstimmung mit den Messwerten aus **Tabelle 1**. Alle errechneten Werte lagen unter den Ergebnissen aus dem Zugversuch und zwar mit sich verstärkender Tendenz

bei abnehmender Temperatur, was erneut die Ausführungen in [9] bestätigt. Die nachstehenden Angaben beinhalten demzufolge alle einen zusätzlichen Sicherheitsbeiwert von $\neq > 17\%$. Entsprechend wurde auf die Ermittlung von Vergleichsspannungen unter zu Hilfenahme einer sonst gesondert anzuwendenden Festigkeits-hypothese verzichtet. Die errechneten Streckgrenzenverhältnisse $R_{p0,2} / R_m$ aus **Tabelle 1** wurden entsprechend zur Berechnung einer theoretischen Streckgrenze für die Werkstoffauswahl verwendet. (**Tabelle 4, Bild 5** [6]). Da Gusswerkstoffe mit sinkender Temperatur höhere Werte für die Zugfestigkeit und Streckgrenze und zwar in etwa ähnlicher Relation aufweisen, konnten für alle untersuchten Temperaturen die selben Streckgrenzenverhältnisse angewandt werden [9, 10].

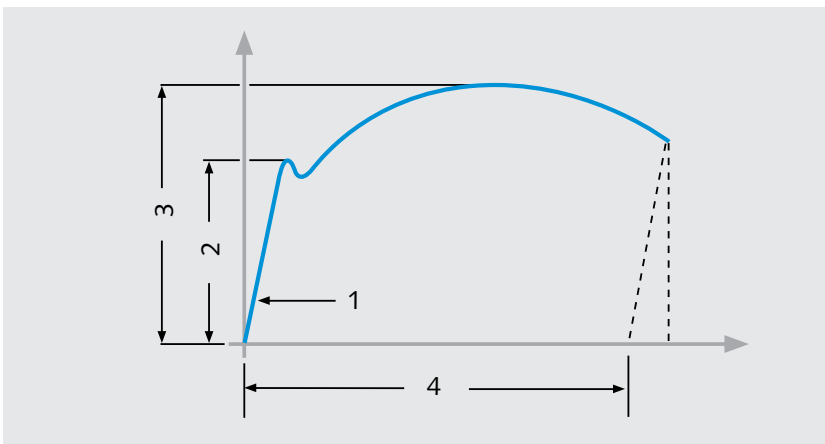


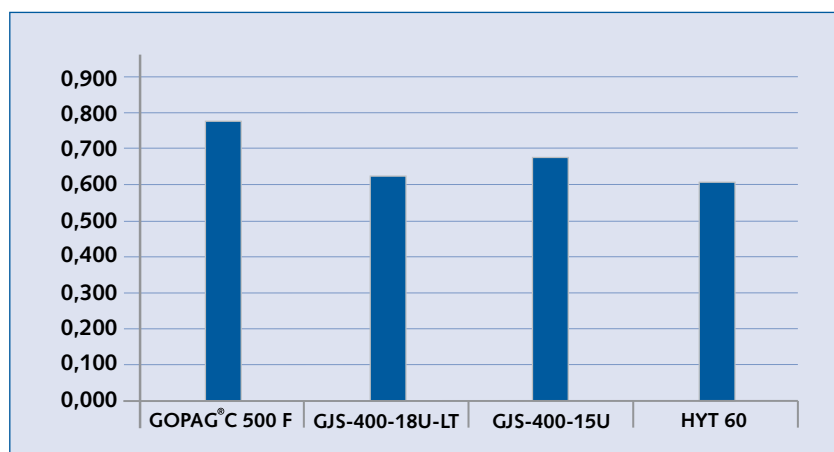
Bild 5

1	HOOKEsche Gerade
2	Streckgrenze $R_{p0,2}$
3	Zugfestigkeit R_m
4	Bruchdehnung A

Streckgrenzen-/ Zugfestigkeitsverhältnis

Werkstoff	$R_{p0,2} / R_m$
GOPAG® C 500 F	0,778
GJS-400-18U-LT	0,641
GJS-400-15U	0,670
HYT 60	0,610

Tabelle 4



Die als Produkt aus Streckgrenzenverhältnis und Berstdruck ($R_{p0,2} / R_m \times P$ Berstdruck) ermittelten Streckgrenzen (**Bild 5**) zeigen die eigentlichen, für

den Konstrukteur wesentlichen Parameter zur Beurteilung der Werkstoffe (**Tabelle 5**). Sie beschreiben den jeweils maximalen Druck in Abhängig-

keit von der Temperatur, mit denen die Materialien belastet werden können, ohne dass eine bleibende Verformung eintritt.

Streckgrenzenverhältnis x Berstdruck als Äquivalent zur Streckgrenze

EN-GJS-400-15U			EN-GJS-400-18U-LT			GOPAG® C 500 F			HYT 60		
22 °C	- 20 °C	- 40 °C	22 °C	- 20 °C	- 40 °C	22 °C	- 20 °C	- 40 °C	22 °C	- 20 °C	- 40 °C
1654	1717	1914	1490	1569	1631	2223	2276	2313	2295	2357	2483
1663	1748	1951	1454	1569	1570	2421	2257	2271	2291	2386	2501
-	1747	1924	1466	1578	1576	2323	2267	2442	-	2218	2417

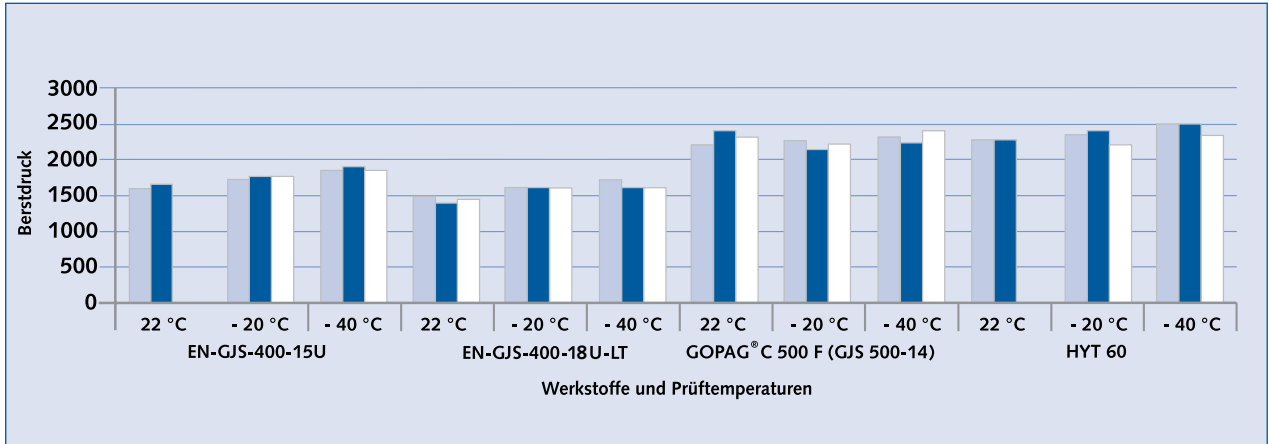
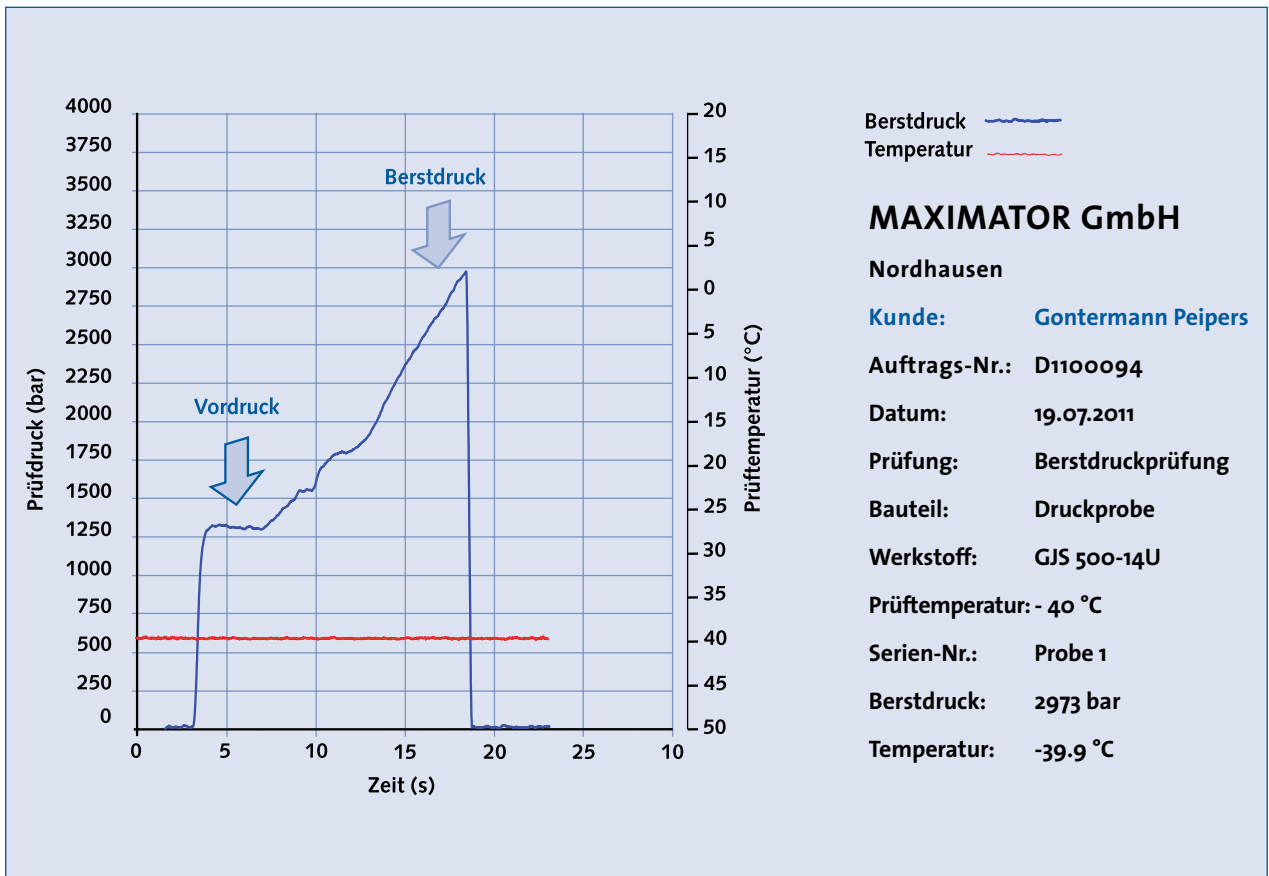


Tabelle 5

Im gesamten Temperaturspektrum erreicht der GOPAG® C 500 F eine Streckgrenze von durchschnittlich **2310 bar**. Bei einem Sicherheitsbeiwert von 3 ergibt sich daraus bei einer Wandstärke von 3 mm ein maximaler Nenndruck von 770 bar bzw. 924 bar mit einem „S“ von 2,5. Das

bedeutet für eine normale 250 bar Anwendung ein Sicherheitsbeiwert von 9,2 und damit erhebliche Reserven für den Konstrukteur.

wert von 3 ergibt sich daraus bei einer Wandstärke von 3 mm ein maximaler Nenndruck von 770 bar bzw. 924 bar mit einem „S“ von 2,5. Das bedeutet für eine normale 250 bar Anwendung ein Sicherheitsbeiwert von 9,2 und damit erhebliche Reserven für den Konstrukteur.



3 Zusammenfassung

Alle getesteten Werkstoffe zeigten im Versuch bei R_m und $R_{p0,2}$ keine signifikanten Schwankungen. Die Berstversuche haben gezeigt, dass alle drei Gusseisen mit Kugelgraphit auch im Tieftemperaturbereich z.B. für Hydraulikblöcke einsetzbar sind.

Der als einziger in der Testreihe für den Einsatz bei -20°C klassifizierte Werkstoff EN-GJS-400-18U-RT unterscheidet sich tendenziell unter Versuchsbedingungen nicht von den anderen untersuchten Materialien.

Der GOPAC® C 500 F weist von allen geprüften Werkstoffen die größte Konstanz der mechanischen Eigenschaften in allen Temperaturbereichen auf und erzielt dabei Werte, die mit denen des HT 60 vergleichbar sind.

Der negative Einfluss von tiefen Temperaturen, die die Kerbschlagzähigkeit bei Gusswerkstoffen stark vom Stahl ab-

weichen lässt, wurde im Berstversuch nicht nachgewiesen. Insofern stellt sich erneut die Frage, in wie weit nicht die Bewertung von anderen Materialeigenschaften wie z.B. die Streckgrenze oder die Bruchmechanik eine praxisnähere Einschätzung der Eignung für den Einsatz im Tieftemperaturbereich gegenüber dem Kerbschlagbiegeversuch darstellen. Es wurde kein Risiko für den Einsatz des GOPAC® C 500 F beim Einsatz in Tieftemperaturen nachgewiesen. Die wirtschaftlichen Vorteile, die für den Einsatz dieses Werkstoffes in [2] nachgewiesen wurden, sind also auch im Off-Shore- und maritimen Bereich nutzbar.

Die durchgeführten praktischen Testreihen haben – wie bereits bei der Umstellung von geschmiedeten zu gegossenen Kurbelwellen – erneut gezeigt, welche Chancen moderne Gusseisenwerkstoffe den Konstrukteuren heute bieten. Gemeinsam mit herausragen-

den Eigenschaften von Gusseisen bei der mechanischen Bearbeitung ergeben sich so innovative Lösungen, die erheblich zur Kostenreduzierung unter Gesamtkostenbetrachtung (Total Cost) beitragen können.



Literatur

- [1] Klaus Herfurth, Ralf Gorski, Klaus Beute, Marcus Hering, *GOPAC® C 500 F Gusswerkstoff für den Maschinenbau mit höherer Festigkeit und Bruchdehnung bei sehr homogener Härteverteilung*
- [2] Ralf Gorski, Friedemann Dörfer, *Doppeleffekt durch schnelleres Bohren bei geringerem Werkzeugverschleiß – mehr Fertigteile pro Maschine und Schicht*
- [3] *Berstdruckversuch Vergleich Gopag® C 500 F und 11SMnPb30+C, Hydac Fluidtechnik, September 2010*
- [4] Friedemann Dörfer, *Erhöhung des Kundennutzen durch Einsatz von ferritischen Spärogusslegierungen*
- [5] www.hydraulicsupermarket.com/technical21.html
- [6] Prof. Dr.-Ing. Alfons Fischer, *Praktikum Grundlagen der Werkstofftechnik Scriptum für Studierende der Universität Duisburg-Essen*
- [7] *VDG Fachbericht 083 (2001) Teilprojekt Hochfeste GGG-Gussteile mit ausreichender Duktilität*
- [8] *EN DIN 1563 2011 Anhang F Bruchzähigkeit, Schlagenergie und Duktilität von GJS*
- [9] Stephan Hasse, *Duktiles Gusseisen, Handbuch für Gusserzeuger und Gussverwender, Verlag Schiele & Schön*
- [10] *Untersuchungen zum Verformungsverhalten von Gusseisen mit Kugelgraphit GGG-38/42 im Temperaturbereich zwischen 77 K und 873 K*
- [11] *DNV – Det Norske Veritas, Rules for ships Pt. 2 Ch. 2 Sec. 8*