

# Austenitische Gusseisen

Austenitische Gusseisensorten sind hochlegierte Gusseisen mit Lamellen- und Kugelgraphit, die als gemeinsames Merkmal eine austenitische Grundmasse haben. Austenitische Gusseisen weisen eine Reihe von besonderen technologischen und physikalischen Eigenschaften auf, die sie für eine breite Vielfalt von Anwendungen interessant machen: Korrosionsbeständigkeit, Zunderbeständigkeit, hohe Warmfestigkeit, Temperaturwechselbeständigkeit, hohe Duktilität, Verschleiß- und Erosionsbeständigkeit, günstige Laufeigenschaften, Kaltzähigkeit, Nichtmagnetisierbarkeit und besonders hohe oder niedrige thermische Ausdehnungskoeffizienten. Mit Erscheinungsdatum Februar 2003 ist jetzt die neue Europäische Norm DIN EN 13 835 „Gießereiwesen - Austenitische Gusseisen“ erschienen, die im folgenden ausführlich kommentiert wird.

## 1 Normung und Werkstoffentwicklung

Die austenitischen Gusseisensorten sind nach DIN EN 13835 genormt. 1927 wurden zunächst die Sorten mit Lamellengraphit und seit etwa 1950 auch als solche mit Kugelgraphit entwickelt. Infolge der Anpassung der chemischen Zusammensetzung an die jeweiligen Anforderungen und die spätere Einführung sehr ähnlicher Sorten Kugelgraphit kam es zu einer großen Sortenvielfalt [1 bis 5]. In der **Tabelle 1** werden die Sorten und ihre chemischen Zusammensetzungen, in **Tabelle 2** die mechanischen Eigenschaften und **Tabelle 3** Anhaltswerte der physikalischen Eigenschaften angegeben. Eine Tabelle im Normen-Anhang gibt eine Übersicht der

Merkmale und Anwendungsbereiche der verschiedenen Sorten.

International sind noch die USA-Normen ASTM A436, A439 und A571 sowie die ISO-Norm -2892-1973 -von- Bedeutung.- Letzgenannte befindet sich zur Zeit in der Neubearbeitung. Die **Tabelle 4** enthält eine Übersicht der nationalen und internationalen Normen und Bezeichnungen der verschiedenen Sorten. Die austenitischen Gusseisen werden weltweit häufig kurz als "Ni-Resist" beziehungsweise mit einem davon abgeleiteten Handelsnamen gemäß der letzten Spalte von **Tabelle 4** bezeichnet.

Die verschiedenen Sorten wurden weltweit in Normen übernommen, wobei sich allerdings bald herausstellte, dass manche Sorten nur einen sehr eng begrenzten Anwendungsbereich hatten oder überflüssig waren. Hinzu kam, dass die Sorten mit Lamellengraphit in steigendem Maße durch die entsprechenden Werkstoffe mit Kugel-

graphit verdrängt wurden, die bessere Festigkeitseigenschaften und Zunderbeständigkeit haben.

In der europäischen Norm DIN EN 13835 "Gießereiwesen – Austenitische Gusseisen" (**Tabellen 1 bis 3**) wurden die Sortenvielfalt deutlich reduziert und die Werkstoffe in zwei Gruppen, "Normalsorten" und "Sondersorten" aufgeteilt. Wie der Vergleich in **Tabelle 4** zeigt, sind von den vormals acht Sorten von austenitischem Gusseisen mit Lamellengraphit noch zwei geblieben. Dies sind die Normalsorte EN-GJLA-XNiCuCr15-6-2 (vormals GGL-NiCuCr15 6 2) und die Sondersorte EN-GJLA-XNiMn13-7 (vormals GGL-NiMn 13 7). Die anderen Sorten mit Lamellengraphit wurden in der Praxis weitgehend durch die entsprechenden Gusseisen mit Kugelgraphit ersetzt und sind daher nicht mehr in die neue EN-Norm aufgenommen (siehe konstruieren + giessen H.3/ 2003, S. 31 – 32).

<sup>1)</sup> Dr.-Ing. Klaus Röhrig, Konsulent des NiDi Nickel Development Institute

**Tabelle 1: In EN 13835 genormte austenitische Gusseisen und ihre chemische Zusammensetzung**

Graphitform	Werkstoffbezeichnung		Chemische Zusammensetzung [Masse - %]						
	Kurzzeichen	Nummer		Si	Mn	Ni	Cr	P	Cu
<b>Normalsorten</b>									
lamellar	EN-GJLA-XNiCuCr15-6-2	EN-JL3011	max. 3,0	1,0 - 2,8	0,5 - 1,5	13,5 - 17,5	1,0 3,5	max. 0,25	5,5 - 7,5
kugelig	EN-GJSA-XNiCr20-2	EN-JS3011	max. 3,0	1,5 - 3,0	0,5 - 1,5	18,0 - 22,0	1,0 - 3,5	max. 0,08	max. 0,50
	EN-GJSA-XNiMn23-4	EN-JS3021	max. 2,6	1,5 - 2,5	4,0 - 4,5	22,0 - 24,0	max. 0,2	max. 0,08	max. 0,50
	EN-GJSA-XNiCrNb20-2	EN-JS3031 <sup>1)</sup>	max. 3,0	1,5 - 2,4	0,5 - 1,5	18,0 - 22,0	1,0 - 3,5	max. 0,08	max. 0,50
	EN-GJSA-XNi22	EN-JS3041	max. 3,0	1,0 - 3,0	1,5 - 2,5	21,0 - 24,0	max. 0,5	max. 0,08	max. 0,50
	EN-GJSA-XNi35	EN-JS3051	max. 2,4	1,5 - 3,0	0,5 - 1,5	34,0 - 36,0	max. 0,2	max. 0,08	max. 0,50
	EN-GJSA-XNiSiCr35-5-2	EN-JS3061	max. 2,0	4,0 - 6,0	0,5 - 1,5	34,0 - 36,0	1,5 - 2,5	max. 0,08	max. 0,50
<b>Sondersorten</b>									
lamellar	EN-GJLA-XNiMn13-7	EN-JL3021	max 3,0	1,5 - 3,0	6,0 - 7,0	12,0 - 14,0	max. 0,2	max.0,25	max. 0,5
kugelig	EN-GJSA-XNiMn13-7	EN-JS3071	max 3,0	2,0 - 3,0	6,0 - 7,0	12,0 - 14,0	max. 0,2	max.0,08	max. 0,5
	EN-GJSA-XNiCr30-3	EN-JS3081	max 2,6	1,5 - 3,0	0,5 - 1,5	28,0 32,0	2,5 - 3,5	max.0,08	max. 0,5
	EN-GJSA-XNiSiCr30-5-5	EN-JS3091	max 2,6	5,0 - 6,0	0,5 - 1,5	28,0 32,0	4,5 - 5,5	max.0,08	max. 0,5
	EN-GJSA-XNiCr35-3	EN-JS3101	max 2,4	1,5 - 3,0	0,5 - 1,5	34,0 36,0	2,0 - 3,0	max.0,08	max. 0,5

Tabelle 2: Mechanische Eigenschaften der in EN 13835 genormten austenitischen Gusseisen

Werkstoffbezeichnung		Zugfestigkeit $R_m$ [N/mm <sup>2</sup> ]	0,2 %-Dehngrenze $R_{p0,2}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Bruchdehnung $A$ [%]	Mittelwert für die Kerbschlagarbeit $A_{min.}^{3)}$ [ J ]	Charpy-V-Kerbschlagarbeit $Av^{2)}$ [ J ]	Elastizitätsmodul $E^{2)}$ [kN/mm <sup>2</sup> ]	Brinellhärte $HB^{2)}$	Druckfestigkeit $R_D^{2)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]
Kurzzeichen	Werkstoffnummer								
<b>Normalsorte</b>									
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 <sup>1)</sup>	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 <sup>1)</sup>	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	-
<b>Sondersorte</b>									
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	-

<sup>1)</sup> Freigestellte Anforderung nach Vereinbarung zwischen Hersteller und Käufer

<sup>2)</sup> Nicht genormt

<sup>3)</sup> Mittelwert für die Kerbschlagarbeit aus 3 Versuchen an Charpy-V-Proben nach EN 10045-1

Auch bei den austenitischen Gusseisen mit Kugelgraphit wurden einige Sorten gestrichen. Von den vormalig 14 Sorten sind noch 10 geblieben. Dabei wurden in einigen Fällen auch die Zusammensetzungsbereiche der Werkstoffsorten geändert. Die Sorte GGG-NiCr 20 3 fand mit der Sorte GGG-NiCr 20 2 gemeinsam Eingang in die Legierung EN-GJSA-XNiCr20-2, die einen entsprechend breiteren Chromgehaltbereich und die Mindesteigenschaften von GGG-NiCr 20 2 hat. Gestrichen wurden die drei Sorten GGG-NiSiCr 20 5 2, GGG-NiCr 30 1 und GGG-NiSiCr 30 5 2.

Die EN-Norm enthält wie die alte DIN-Norm einen umfangreichen informativen Anhang. Er umfasst:

- Anhang A: Eigenschaften und Anwendungen der austenitischen Gusseisensorten (Diese Tabelle gab es bereits in DIN 1694; sie wurde jedoch aktualisiert).
- Anhang B: Wärmebehandlung (Dieser Abschnitt wurde gegenüber DIN 1694 erweitert und beschreibt kurz den Ablauf des besonders im Zusammenhang mit der Spannungsrissskorrosion wichtigen Spannungsarmglühens sowie der Wärmebehandlung zur Gefügestabilisierung bei hohen Temperaturen)
- Anhang C: Zusätzliche mechanische und physikalische Eigenschaften. (Wie bereits in DIN 1694, sind

auch hier die Wertebereiche von besonderen Eigenschaften für die verschiedenen austenitischen Gusseisensorten aufgeführt. Dies ist als Übersicht in Tabellen aufgeführt (vorm. Tabellen C.1 und C.2). Zusätzlich werden die Bezugswerte für die mechanischen Eigenschaften bei tiefen Temperaturen von EN-GJSA-XNiMn 23-4 sowie die Bezugsdaten für mechanische Eigenschaften von austenitischem Gusseisen mit Kugelgraphit bei erhöhten Temperaturen angegeben).

- Anhang D: Einfluss von Legierungselementen. (Der Einfluss von Legierungselementen wird kurz umris-

Tabelle 3: Anhaltswerte für die physikalischen Eigenschaften der in EN 13835 genormten austenitischen Gusseisen

Werkstoffbezeichnung		Dichte [kg/dm <sup>3</sup> ]	Längenausdehnungskoeffizient (zwischen 20 und 200 °C) [mm/(m×K)]	Wärmeleitfähigkeit [W/(m×K)]	Spezifische Wärmekapazität [J/(g×K)]	Spezifischer elektrischer Widerstand [mW×m]	Permeabilität (bei H = 79,58 A/cm)
Kurzzeichen	Werkstoffnummer						
<b>Normalsorte</b>							
EN-GJLA-XNiCuCr15-6-2	EN-JL3011	7,3	18,70	39,00	46 – 50	1,6	1,03
EN-GJSA-XNiCr20-2	EN-JS3011	7,4 – 7,45	18,70	12,60	46 – 50	1,0	1,05
EN-GJSA-XNiMn23-4	EN-JS3021	7,45	14,70	12,60	46 – 50	-	1,02
EN-GJSA-XNiCrNb20-2	EN-JS3031	7,40	18,70	12,60	46 – 50	1,0	1,04
EN-GJSA-XNi22	EN-JS3041	7,40	18,40	12,60	46 – 50	1,0	1,02
EN-GJSA-XNi35	EN-JS3051	7,60	5,00	12,60	46 – 50	-	-
EN-GJSA-XNiSiCr35-5-2	EN-JS3061	7,45	15,10 <sup>1)</sup>	12,60	46 – 50	-	-
<b>Sondersorte</b>							
EN-GJLA-XNiMn13-7	EN-JL3021	7,40	17,70	39,00	46 – 50	1,2	1,02
EN-GJSA-XNiMn13-7	EN-JS3071	7,30	18,20	12,60	46 – 50	1,0	1,02
EN-GJSA-XNiCr30-3	EN-JS3081	7,45	12,60	12,60	46 – 50	-	-
EN-GJSA-XNiSiCr30-5-5	EN-JS3091	7,45	14,40	12,60	46 – 50	-	1,10
EN-GJSA-XNiCr35-3	EN-JS3101	7,70	5,00	12,60	46 – 50	-	-

<sup>1)</sup> Dieser Wert ist fraglich und von keiner Dokumentation belegt; möglicherweise handelt es sich um einen Wert für einen größeren Temperaturbereich.

**Tabelle 4: 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	ASTM A 439:1983 ASTM A 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 Cr2	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	Nicrosilalspheronic
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 <sup>1)</sup>	-	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

<sup>1)</sup> Austenitisches Gusseisen mit Kugelgraphit für Druckbehälter für Tieftemperaturbetrieb

sen. Vom Umfang her entspricht dies dem früheren Beiblatt 1 der DIN 1694. Von einer Erweiterung wurde aus Gründen der Kürze der Norm abgesehen).

- Anhang E: Prüfung. (Auch hier gibt es einen kurzen erläuternden Text, der praktisch dem Text im früheren Beiblatt 1 der DIN 1694 entspricht).
- Anhang F: Querverweis auf weitere nationale/internationale Normen. (Auch hier wurde die "Tradition" der alten DIN 1694 beibehalten, Querverweise auf andere internationale Normen zu geben).

Es sei an dieser Stelle betont, dass, um der Anforderung Genüge zu tun, nur Normen zu verwenden, die dem "Stand der Technik" entsprechen, die neue Europäische Norm vorzugsweise angewendet werden sollte, jedoch kein Verbot der Verwendung von DIN 1694 besteht. Dies sei insbesondere deshalb erwähnt, weil mit dem Übergang zur Europäischen Norm einige Werkstoffsorten entfallen sind, die für die eine oder andere Anwendung noch interessant sein könnten. Auch in den

ASTM-Normen A 436, A 439 und A 571 sind die meisten der in der DIN EN 13835 gestrichenen Werkstoffe enthalten. Wird eine dieser Werkstoffsorten aufgrund ihrer speziellen Eigenschaften benötigt, so ist eine Spezifizierung nach DIN 1694 immer noch möglich. Allerdings muss dem Kunden gegenüber angegeben werden, dass eine alte Norm angewendet wird, die nicht mehr dem "Stand der Technik" entspricht.

Während der Fertigstellung dieser Europäischen Norm wurde die Überarbeitung der bestehenden internationalen Norm ISO 2892:1973 begonnen. Die neue ISO-Norm, die derzeit als Entwurf vorliegt, hat eine völlig andere Struktur als die bestehende ISO-Norm. Beim Erarbeiten durch das zuständige Technische Komitee ISO/TC 25/SC 6 wurden Anregungen aus der Europäischen Norm wechselseitig berücksichtigt. Derzeit entspricht der neue Entwurf der ISO-Norm in ihrem Wortlaut weitgehend der Europäischen Norm. Ziel ist, dass diese ISO-Norm nach ihrer Fertigstellung weltweit angewendet wird.

## 2 Chemische Zusammensetzung und Wirkung der wichtigen Legierungselemente

Die chemische Zusammensetzung der austenitischen Gusseisen richtet sich einerseits nach dem Erfordernis einer stabilen austenitischen Grundmasse und andererseits nach den geforderten Eigenschaften. Die chemische Zusammensetzung ist daher anders bei üblichen legierten oder niedrig legierten Gusseisen in der Norm vorgeschrieben (Tabelle 1). Bei den austenitischen Gusseisen handelt es sich also um hochlegierte Werkstoffe, vergleichbar den Edeltählen.

### 2.1 Sicherung einer stabilen austenitischen Grundmasse

Um den Austenit bis zu tiefen Temperaturen, nach Wärmebehandlungen und/oder bei mechanischen Beanspruchungen stabil zu halten, ist ein hoher Gehalt an austenitstabilisierenden Elementen wie Nickel, Mangan und Kupfer erforderlich, die zu einem Nickel-Äquivalent zusammengefasst werden können.

Für den Bereich bis knapp unter Raumtemperatur wird in [6] für Gusseisen mit Kugelgraphit folgende Formel vorgeschlagen:

$$\text{Nickel-Äquivalent} = \% \text{Ni} + 2 \cdot \% \text{Mn} + \% \text{Cr} > 23,5 \% \quad (1)$$

In der Grundmasse gelöstes Chrom wirkt wie bei Edelfählen Austenit stabilisierend, ähnliches gilt für Kohlenstoff. Bei Gusseisen mit Lamellengraphit kann ein Teil des Nickels durch Kupfer ersetzt werden.

Bei noch tieferen Temperaturen kann es bei manchen austenitischen Gusseisen zu einer Umwandlung zu Martensit kommen, vor allem wenn eine mechanische Spannung hinzukommt. **Tabelle 5** enthält einige Anhaltswerte für verschiedene Zusammensetzungen.

Die temperatur- und spannungsinduzierte Martensitbildung ist bei austenitischen Gusseisen nicht nur für den Einsatz bei tiefen Temperaturen von Bedeutung, sondern auch bei einer Montage durch Ein- oder Aufschrumpfen sowie dann, wenn es um niedrige Magnetisierbarkeit geht [8, 9].

Bei Gusseisen mit für die Austenitstabilisierung knapp eingestellten Legierungsgehalten spielt auch die Wärmebehandlung eine Rolle, da - wie erwähnt - in der Grundmasse gelöste Kohlenstoff- und Chromgehalte Austenit stabilisierend wirken. Wenn das Gussstück nach einem Lösungsglühen bei 900 bis 1000 °C abgeschreckt wird, bleiben mehr Kohlenstoff und Chrom in Lösung und der Austenit ist stabiler als nach einem langsamen Abkühlen oder einem Spannungsarmglühen, wo sie sich ausscheiden, sei es in Form von chromreichen Carbiden oder durch Anlagern am Graphit.

Um eine Umwandlung zu Martensit bis zu sehr tiefen Temperaturen zu vermeiden, wurden eine kaltzähe Sorte mit erhöhtem Nickel- und Mangangehalt (GJSA-XNiMn 23 4) sowie speziell für niedrige Magnetisierbarkeit die manganreichen Sorten GJLA-XMnNi13-7 und GJSA-XMnNi13-7 entwickelt.

**Tabelle 5: Anhaltswerte für Temperaturen der temperatur- und spannungsinduzierten Martensitbildung einiger austenitischer Gusseisen [7]**

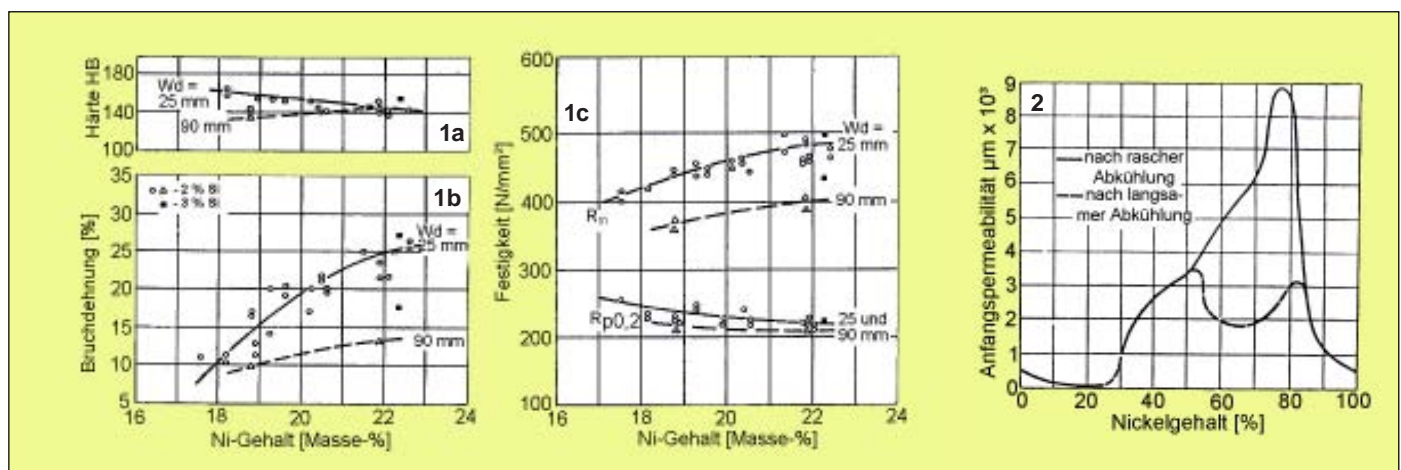
nomielle chemische Zusammensetzung	Graphitform	Martensitbildung, temperatur-induziert [°C]	Martensitbildung, -spannungs-induziert [°C]
20 % Ni, 1 % Cr	Lamellen	-80	-30
20 % Ni, 2 % Cr	Lamellen	-110	-80
20 % Ni, 3 % Cr	Lamellen	-180	-140
20 % Ni, 1 % Cr	Kugel	-85	-35
20 % Ni, 2 % Cr	Kugel	-130	-75
20 % Ni, 3 % Cr	Kugel	-180	-110
17 % Ni, 2 % Cr, 5 % Cu	Lamellen	-170	-90
17 % Ni, 2 % Cr, 5 % Cu	Kugel	-140	-80
22 % Ni, 0,1 % Cr, 2 % Mn	Kugel	-50	-10
22 % Ni, 0,1 % Cr, 4 % Mn	Kugel	< -196	-90
20 % Ni, 3 % Cr, 5 % Si	Lamellen	-150	-80
20 % Ni, 2 % Cr, 5 % Si	Kugel	-90	-20
30 % Ni, 3 % Cr	Lamellen	< -196	-196
30 % Ni, 3 % Cr	Kugel	< -196	-150

## 2.2 Nickel

Nickel ist das Hauptlegierungselement. Um den Austenit bis zu tiefen Temperaturen stabil zu halten, ist ein Nickelgehalt von etwa 20 % erforderlich. Dieser Gehalt liegt höher als bei den üblichen rostfreien Stählen. Er ist notwendig, da die unterstützende Wirkung eines hohen Chromgehalts fehlt. Chrom kann bei einem graphitischen Gusseisen nur in begrenzter Menge verwendet werden, da sonst die übermäßige Carbidgebildung eine zu hohe Härte und damit Bearbeitungsschwierigkeiten, ein Verspröden und ein Verschlechtern der Gießeigenschaften verursachen würde. Ein Teil des Nickels kann unter Umständen durch andere Austenit stabilisierende Elemente wie Mangan oder Kupfer ersetzt werden. Da Mangan aber nichts zur Korrosions- und Hitzebeständigkeit beiträgt, wird es in höheren Gehalten nur bei den nichtmagnetisierbaren oder kaltzähen Sorten verwendet. Kupfer kann nur bei Gusseisen mit Lamellengraphit, nicht aber bei Gusseisen mit Kugelgraphit als Ersatz für Nickel dienen, da es die Kugelgraphitbildung stört.

Die Gehalte an Nickel, Chrom und Mangan können nach Gleichung 1 in einem Nickel-Äquivalent zusammengefasst werden. In Fällen, wo ein stabil austenitisches Gefüge bis knapp unter Raumtemperatur verlangt wird, ist ein Nickel-Äquivalent von mindestens 23,5 % erforderlich [6]. Bei niedrigeren Werten kann sich unter Umständen bei mehrfachem Spannungsarmglühen, bei tiefen Temperaturen oder unter mechanischer Spannung Martensit bilden, der den Werkstoff versprödet. Bei besonderen Anforderungen muss das Nickeläquivalent noch höher sein (vergleiche **Tabelle 5**). Meist stellt die Instabilität aber kein Problem dar, so dass der Nickelgehalt aus Kostengründen an die untere Grenze des Normbereichs gelegt wird. Wegen der möglichen Nickelverarmung in Seigerungszone sollte allerdings bei größeren Wanddicken ein etwas höherer Nickelgehalt eingestellt werden.

Der Einfluss von Nickel auf die mechanischen Eigenschaften geht aus **Bild 1** hervor. Eine erwähnenswerte Wirkung hat Nickel auf den thermischen Ausdehnungs-



**Bild 1. Einfluss von Nickel auf die mechanischen Eigenschaften von GJSA-XNiCr20-2 in zwei Wanddicken [10]**

**Bild 2. Einfluss des Nickelgehalts auf die Anfangspermeabilität von Eisen-Nickel-Legierungen nach zwei Wärmebehandlungen [11]**

koeffizienten, worauf an betreffender Stelle noch eingegangen wird. Im Gegensatz zu austenitischen Stählen sind nicht alle austenitischen Gusseisen nichtmagnetisierbar. Bis etwa 25 % Ni sind sie unmagnetisch, bei höheren Nickelgehalten werden sie wieder magnetisierbar, was manchmal etwas verblüffend wirkt. Der Einfluss des Nickelgehalts bei Eisen-Nickel-Legierungen geht aus **Bild 2** hervor.

## 2.3 Chrom

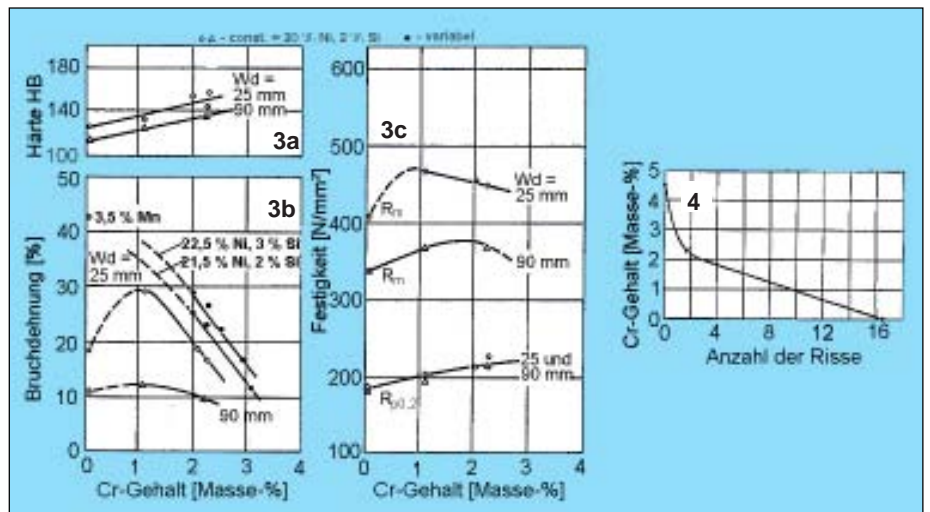
Die meisten austenitischen Gusseisen enthalten einige Prozent Chrom. Chrom wirkt austenitstabilisierend, so dass die chromfreien Sorten etwas höhere Nickelgehalte haben müssen.

Die wesentlichen Wirkungen von Chrom sind Verbesserung der Korrosionsbeständigkeit, der Festigkeit, der Erosions- und Verschleißbeständigkeit, der Hitzebeständigkeit sowie der Schweißneigung und des Speisungsverhaltens. Andererseits wirkt Chrom durch eine Carbiddbildung versprödet und erschwert die Bearbeitung. Ein Problem kann entstehen, wenn einerseits im Interesse der Korrosions- und Erosionsbeständigkeit der Chromgehalt an die obere Grenze gelegt wird, andererseits, wie nach der Norm möglich, eine Kerbschlagarbeit von 13 J gefordert wird. Hier muss also immer ein Kompromiss geschlossen werden.

Der Einfluss des Chromgehalts auf die mechanischen Eigenschaften eines austenitischen Gusseisens mit rund 20 % Ni bei zwei Wanddicken ist im **Bild 3** dargestellt. Nach praktischer Erfahrung [12] liegt der günstigste Chromgehalt beim Herstellen von dichten Gusstücken aus den Sorten GJSA-XNi20-2 und GJSA-XNiNb20-2 bei 1,5 bis 2,0 % Cr. Dieser Bereich bietet den besten Kompromiss zwischen Beständigkeit gegen Korrosion und Oxidation bei hohen Temperaturen, Verschleiß, brauchbaren mechanischen Eigenschaften und einem guten Speisungsverhalten in einem weiten Bereich von Gusstückwandstärken. Eine Kerbschlagarbeit von 13 J lässt sich aber nicht immer treffsicher erreichen [12].

Durch Chrom erzeugte Carbide sind ferromagnetisch und erhöhen die magnetische Permeabilität.

Chromfreie Sorten wie GJSA-XNi22 (Ni-Resist Typ D-2C) haben sich als außerordentlich schwierig beim Herstellen von dichten Gusstücken erwiesen [13]. Die üblichen Verfahren bei der Speiserbemesung und -anordnung sind oft unwirksam, und dichte Gusstücke können nur über die



**Bild 3.** Einfluss von Chrom auf die mechanischen Eigenschaften eines austenitischen Gusseisens mit 20 % Ni bei zwei Wanddicken [11]

**Bild 4.** Einfluss des Chromgehalts auf die Schweißneigung (Neigung zur Rissbildung) von austenitischen Gusseisen mit 22 % Ni [14]

ausgedehnte Anwendung von Kokillen hergestellt werden. Da viele dieser Gusstücke einem Lecktest bei hohen Drücken unterzogen werden, kann das Auftreten dieser Mikrolunkerung für den Gießer ein erhebliches Problem darstellen. Auch die Schweißneigung ist schlechter als bei den chromhaltigen Sorten (**Bild 4**). Ein zu hoher Chromgehalt bindet allerdings soviel Kohlenstoff in den Carbiden, dass die Mikrolunkerneigung wieder zunimmt. Gegebenenfalls kann der Chromgehalt an die Wanddicke angepasst werden, um in dünnen Querschnitten eine zu starke Carbiddbildung zu vermeiden.

## 2.4 Kupfer

Kupfer wirkt sich günstig auf die Korrosionsbeständigkeit in Säuren aus, kann aber in nennenswerten Gehalten nur bei Gusseisen mit Lamellengraphit verwendet werden, da es die Kugelgraphitbildung stört. Ein Zusatz von bis etwa 3 % Cu zu GJSA-XNiCr20-2 wirkt sich nach Laborversuchen bei sorgfältiger Durchführung der Magnesiumbehandlung und niedrigen Calcium- und Aluminiumgehalten auf die Kugelgraphitbildung und die mechanischen Eigenschaften nicht schädlich aus, verbessert aber die Korrosionsbeständigkeit in schwach sauren Medien [15].

Aus wirtschaftlichen Gründen unternommene Versuche, bei den Sorten mit Kugelgraphit Nickel teilweise durch Kupfer zu ersetzen, waren aber in der praktischen Produktion wegen der Schwierigkeiten beim Gefügeeinstellen dagegen letztlich erfolglos.

## 2.5 Mangan

Mangan ist ein wirksamer Austenitstabilisator, leistet aber keinen Beitrag zur Korrosions- oder Hitzebeständigkeit und wird daher als Nickelerersatz nur bei den nichtmagnetisierbaren Sorten GJLA-XNiMn13-7 und GJSA-XNiMn13-7 verwendet. Wenn es zusätzlich noch auf Korrosionsbeständigkeit ankommt, müssen die Sorten mit niedrigen Mangan- und Chromgehalten gewählt werden.

Bei der kaltzähnen Sorte GJSA-XNiMn23-4 dient Mangan zum Ergänzen der Austenitstabilisierung durch Nickel, um das Gefüge auch bei -196 °C langfristig stabil zu halten (vergleiche **Tabelle 5**). Dieser Werkstoff wurde speziell als Tieftemperaturwerkstoff entwickelt (**Bild 5**).

Mangan kann manganreiche Carbide im Gefüge von austenitischem Gusseisen mit Kugelgraphit bilden, wenn sein Gehalt wie bei GJSA-XNiMn23-4 hoch genug ist. Während Chromcarbide eine kantige Form besitzen und dazu neigen, ein Netzwerk auf den Korngrenzen zu bilden, scheiden sich die Mangancarbide im Gegensatz dazu eher in einer runden, vereinzelt Form aus. Mangancarbide lassen sich in austenitischen Gusseisen recht einfach durch eine Lösungsglühbehandlung bei 800 bis 900 °C beseitigen. Seigerungen von Mangan können nach [12] zu instabilen Zonen im Gefüge von GJSA-XNiCr20-2 führen, die die Zähigkeit merklich verschlechtern. Weitere Angaben zur Wirkung eines höheren Mangangehalts enthält [13].

## 2.6 Silicium

Silicium ist ein für graue Gusseisen typisches und notwendiges Element. Aus gießtechnischen Gründen wird sein Gehalt der Wanddicke angepasst, bei geringen Querschnitten an die obere und bei großen an die untere Grenze der in **Tabelle 1** angegebenen Gehalte. Im **Bild 6** ist der Einfluss von Silicium auf die mechanischen Eigenschaften von GJSA-XNiCr20-2 dargestellt. Silicium vermindert die Carbidbildung durch Chrom, so dass mit steigendem Gehalt die Bruchdehnung zunimmt, während Härte und Streckgrenze abfallen.

Bei Gusseisen mit Kugelgraphit muss in dickwandigen Gussstücken der Siliciumgehalt in einem engen Bereich abgestimmt werden, um die Bildung von entartetem Graphit, sogenanntem Chunky-Graphit (**Bild 7**), zu vermeiden [17 bis 19]. Er scheint keinen wesentlichen Einfluss auf die Korrosionsbeständigkeit oder - soweit bekannt - auf die Zunderbeständigkeit auszuüben, verschlechtert aber die mechanischen Eigenschaften. Chunky-Graphit kann mit metallographischen Untersuchungen festgestellt werden. Er lässt sich oft mit bloßem Auge auf einer bearbeiteten Oberfläche anhand des matten Glanzes erkennen. Die Grenzbedingung für die Vermeidung von Chunky-Graphit ist im **Bild 8** dargestellt. Für die Grenze gilt die Beziehung

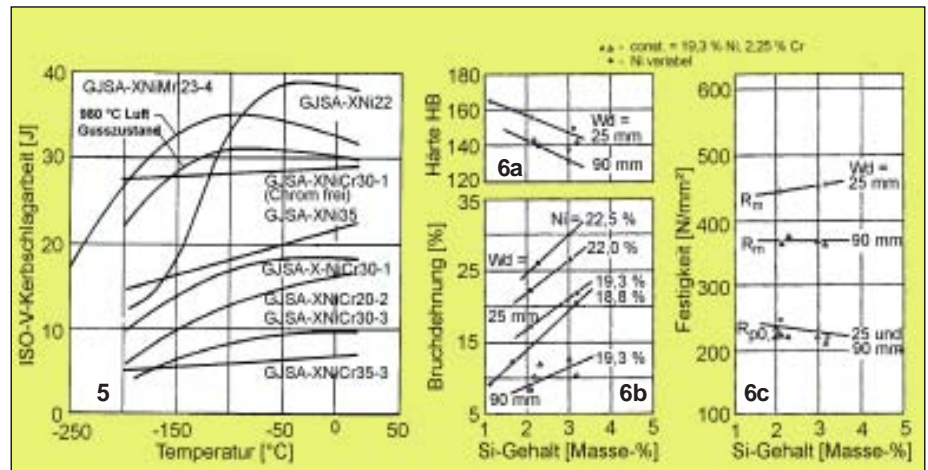
$$\% C + 0,2 \cdot \% Si + 0,06 \cdot \% Ni < 4,4 \quad (2)$$

Zum Vermeiden von Chunky-Graphit muss mit Calcium und Cer freien Magnesiumlegierungen behandelt werden, wenn die Schmelze nicht einen hohen Anteil an Spurenelementen enthält.

Bei hitzebeständigem austenitischem Gusseisen mit Kugelgraphit ist Silicium ein wichtiges Legierungselement, da es die Zunderbeständigkeit durch Bildung einer Schicht aus  $SiO_2$  erheblich verbessert (**Bild 9**). Andererseits wirkt Silicium in hohen Gehalten versprödet und kann bei Sorten mit weniger als etwa 30 % Ni in bestimmten Temperaturbereichen langfristig zur Ausscheidung von Silicid-Phasen oder einer Umwandlung zu einer Art Perlit führen, wodurch der Werkstoff versprödet wird [21]. Seine günstige Wirkung auf die Zunderbeständigkeit kann also nur bei hochnickelhaltigen Sorten wie GJSA-XNiSiCr25-5-2 ausgenutzt werden.

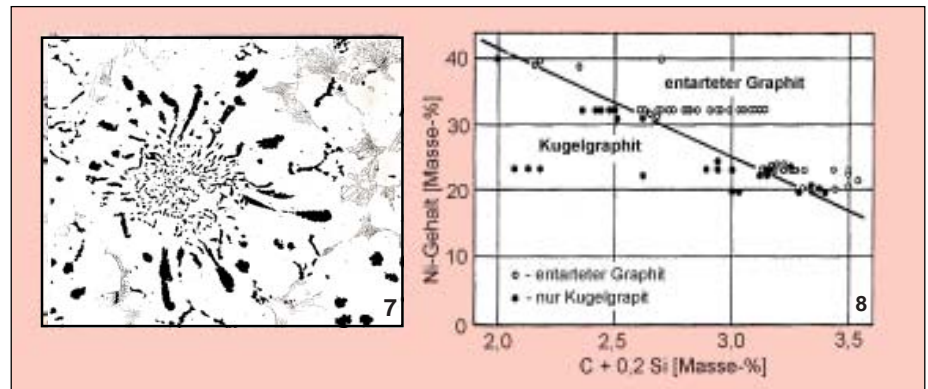
## 2.7 Kohlenstoff

Kohlenstoff ist das für Gusseisenwerkstoffe charakteristische Element. Der Kohlenstoffgehalt von austenitischen Gusseisenarten ist niedriger als bei unlegierten Gusseisen, da Nickel seine Löslichkeit ver-



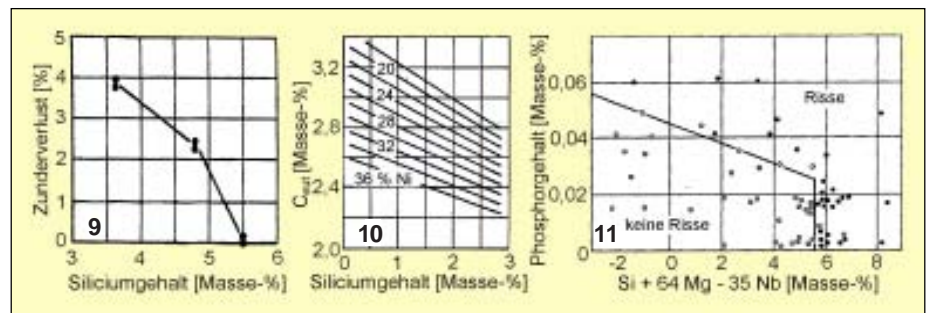
**Bild 5.** Kerbschlagarbeit der kaltzähen Sorte GJSA-XNiMn23-4 in Abhängigkeit von der Temperatur im Vergleich zu den anderen Sorten [16]

**Bild 6.** Einfluss von Silicium auf die mechanischen Eigenschaften von GJSA-XNiCr20-2 bei verschiedenen Wanddicken [16]



**Bild 7.** Chunky-Graphit in dickwandigem austenitischem Gusseisen mit Kugelgraphit

**Bild 8.** Grenze für das Vermeiden von Chunky-Graphit in Abhängigkeit vom Kohlenstoff-, Silicium- und Nickelgehalt [17]



**Bild 9.** Einfluss von Silicium auf die Zunderung von austenitischem Gusseisen mit Kugelgraphit mit 35 % Ni, 2 % Cr, bei 815 °C nach 25 Glühzyklen von je 22 h [20]

**Bild 10.** Eutektischer Kohlenstoffgehalt von austenitischem Gusseisen in Abhängigkeit vom Nickel- und Siliciumgehalt [1].

**Bild 11.** Einfluss von Niob, Silicium, Magnesium und Phosphor auf die Neigung zur Rissbildung beim Schweißen von austenitischem Gusseisen mit Kugelgraphit GGG-NiCr 20 2 [32]

mindert beziehungsweise den eutektischen Punkt zu tieferen Gehalten verschiebt. Der Einfluss des Nickel- und Siliciumgehalts auf den eutektischen Kohlenstoffgehalt geht aus **Bild 10** hervor. Die Berechnung des Kohlenstoffäquivalents kann nach folgender Gleichung [22] vorgenommen werden:

$$CE = \% C + 0,33 \cdot \% Si + 0,047 \cdot \% Ni - 0,0055 \cdot (\% Ni \cdot \% Si) \quad (3)$$

Aus gießtechnischen Gründen wird der Kohlenstoffgehalt möglichst eutektisch oder nah eutektisch also an der oberen Grenze der Bereiche in **Tabelle 1** eingestellt. Ein höherer Kohlenstoffgehalt ver-

mindert die Erstarrungstemperatur und verbessert die Fließfähigkeit und das Speisungsverhalten. Andererseits lassen sich bei niedrigeren Kohlenstoffgehalten höhere Werte der Festigkeit und Zähigkeit erhalten. Eine Begrenzung des Kohlenstoffgehalts wird oft auch wegen der Gefahr von Chunky-Graphit erforderlich. Besonders bei den Sorten mit über 30 % Ni hat sich ein niedriger Kohlenstoffgehalt bewährt.

## 2.8 Molybdän

Molybdän ist in den Normen nicht spezifiziert. Es kann jedoch in Gehalten bis 2 % zugesetzt werden, um die Warmfestigkeit zu erhöhen. Die Möglichkeit eines Molybdänzusatzes wird im Anhang der Norm ausdrücklich erwähnt.

## 2.9 Niob

Niob verbessert die Schweißseignung. Die Sorte GJSA-XNiCrNb20-2 enthält aus diesem Grund 0,12 bis 0,20 % Nb. Nach welchem Mechanismus Niob wirkt und wie weit es sich bei anderen Sorten auswirkt, ist noch unklar.

## 2.10 Schwefel und Phosphor

Beide Elemente wirken sich ungünstig auf die Eigenschaften aus. Der Schwefelgehalt wird bei austenitischem Gusseisen mit Kugelgraphit bei der Magnesiumbehandlung weitgehend entfernt. Bei den Sorten mit Lamellengraphit können hohe Schwefelgehalte zu schwefelreichen Ausscheidungen führen, die nicht nur die Duktilität, sondern auch die Korrosionsbeständigkeit beeinträchtigen können.

Phosphor verschlechtert in bekannter Weise die Zähigkeit und kann Probleme bei der Dichtspeisung verursachen. Bei den Sorten mit Kugelgraphit wirkt er sich zudem ausgesprochen schädlich auf die Schweißseignung aus, worauf an betreffender Stelle ausführlich eingegangen wird.

Bei GJSA-XNiCuCr15-6-2 wird manchmal bei Laufbüchsen ein erhöhter Phosphorgehalt zur Steigerung der Verschleißbeständigkeit vorgesehen.

## 2.11 Magnesium

Magnesium kommt bei austenitischem Gusseisen mit Kugelgraphit zum Erzeugen des Kugelgraphits zur Anwendung. Infolge des hohen Nickelgehalts wird die Magnesiumausbeute bei der Behandlung erhöht und der Abbrand verlangsamt. In den meisten Fällen reicht ein Magnesiumgehalt von 0,05 % völlig aus, um die Kugelgraphitbildung zu gewährleisten.

Die Vorstellung, dass bei austenitischem Gusseisen zu einer befriedigenden Kugelbildung ein höherer Restmagnesiumgehalt benötigt wird, hat sich als falsch herausgestellt. Ein höherer Restmagnesiumgehalt ist nicht nur unnötig, sondern sogar schädlich [13].

## 3 Formen, Schmelzen, Gießen

Austenitische Gusseisen werden heute fast ausschließlich elektrisch erschmolzen. Besondere Maßnahmen sind nicht erforderlich. Die Herstellung im Drehtrommelofen ist möglich, aber schwer beherrschbar.

Schmelzen und Gießen von austenitischem Gusseisen sind einfacher und kostengünstiger als bei Edelfestguss, mit dem es oft im Wettbewerb steht. Infolge der Graphitausscheidung bei der Erstarrung ist die Lunkerneigung der austenitischen Gusseisen geringer als beim Stahlguss, aber vor allem durch die starke Schwindung des austenitischen Gefüges und des tieferen Kohlenstoffgehalts deutlich ungünstiger als bei unlegiertem Gusseisen mit Kugelgraphit. Auch beim Schmelzen und bei der Schmelzebehandlung sind mehr Aufwand und Sorgfalt als bei gewöhnlichem Gusseisen mit Kugelgraphit erforderlich, vor allem, um die Gasaufnahme zu begrenzen und bei den Sorten mit Kugelgraphit Graphitentartungen zu vermeiden. Die Rechnung "Kosten des Gussstücks aus normalem Gusseisen plus Nickelpreis" geht also in keinem Fall auf, sondern führt zu einer Kostenunterdeckung.

Die Gattierung kann aus Kreislauf, Stahlschrott und Legierungsträgern bestehen. Nach den Erfahrungen ist es aber günstig, einen gewissen Anteil an Sonderroheisen (mindestens 15 %, besser 30 %) zum Erzeugen von Gusseisen mit Kugelgraphit zu verwenden. Der Roheisenanteil soll für einen gleichmäßigen Keimzustand sorgen und auf diese Weise das Speisungsverhalten der Gussstücke verbessern und die Porosität vermindern. Allerdings ist der Erfolg dieser Maßnahme kaum quantitativ zu belegen.

Der Anteil an Kreislaufmaterial in der Charge sollte 40 % nicht übersteigen. Höhere Kreislaufanteile können zu einer Anreicherung von Oxiden und Wasserstoff führen und das Speisungsverhalten ungünstig beeinflussen. Bei GJSA-XNiMn23-7 sollte aus diesen Gründen möglichst kein Kreislauf verwendet werden.

Als Legierungsträger sollten möglichst nur Reinmetalle oder Ferro-Legierungen verwendet werden. Chrom-Nickel-Stähle können Titan enthalten, Nickelbasislegierungen Aluminium oder Wolfram, und Kupferschrott Blei, Zinn und Zink sowie oft hohe Gasgehalte.

Grundsätzlich ist zu beachten, dass hochnickelhaltige Schmelzen eine starke Tendenz zur Gasaufnahme (vor allem Wasserstoff, aber auch Stickstoff) haben. Da die Gaslöslichkeit bei der Erstarrung stark abfällt, kommt es dann zur Bildung von

Gasporen. Wegen der Gasaufnahme aus der Luft sollten austenitische Gusseisen so schnell wie möglich geschmolzen und vergossen werden. Alle Einsatzstoffe müssen gasarm und völlig trocken sein. Unter Umständen ist es ratsam, den Schrott vorher zu trocknen oder vorzuwärmen. Durch Gasporen zu Ausschuss gewordene Gussstücke können beim Wiedereinschmelzen ein Problem darstellen. Notfalls muss eine Gasspülung vorgenommen werden.

Die Feuchtigkeit in neu zugestellten Öfen, Pfannen, Rinnen und Geräten kann ebenfalls zur Gasaufnahme führen. Schließlich stellen auch Formstoffe und Schichten eine Gasquelle dar. Besonders Regenerate und Misch-Kreislaufsande sollten kritisch betrachtet werden. Sie können Reste von organischen Bindern, Formstoffzusätzen und verschiedenen Hilfsstoffen enthalten und werden oft aus mehreren Abteilungen der Gießerei zusammengeführt. Die Produktion von austenitischem Gusseisen hat in einer Gießerei in der Regel nur einen geringen Anteil oder erfolgt nur gelegentlich, so dass das Sandsystem auf die Bedürfnisse und Grenzen des wesentlich toleranteren unlegierten Gusseisens abgestimmt ist.

Bei der Herstellung von austenitischem Gusseisen mit Lamellengraphit ist eine niedrige Gießtemperatur günstig. Zur günstigsten Gießtemperatur bei den Sorten mit Kugelgraphit gibt es dagegen unterschiedliche Ansichten. Häufig wird davon ausgegangen, dass mit einer hohen Gießtemperatur die Drossbildung vermieden werden kann. Erfahrungen [13] haben aber gezeigt, dass eine niedrige Gießtemperatur mit niedriger Überhitzung insgesamt eine bessere Gussqualität ergibt. Bei der hohen Gießtemperatur ist besonders die dadurch bedingte hohe Überhitzung der Schmelze schädlich. Die Abstichttemperatur hängt von der Gießtemperatur ab und liegt normalerweise zwischen 1440 und 1480 °C. Schwere Gussstücke über 50 mm Wand-

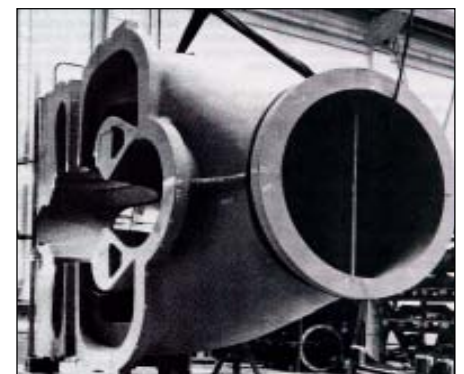


Bild 12: Zweiteiliges, korrosionsbeständiges Pumpengehäuse für eine Meerwasserentsalzungsanlage aus GJSA-XNiCrNb20-2, Masse 6,7 t (Bild: KSB)

dicke können bei 1370 bis 1400 °C gegossen werden, dünnwandige natürlich entsprechend heißer.

Das Impfen hat wie bei allen graphitischen Eisenwerkstoffen große Bedeutung, um eine gute Graphitbildung in den Gussstücken zu erhalten.

Die Gießtemperatur jeder Schmelze sollte mit dem Thermoelement kontrolliert werden. Einen Anhalt für die Gießzeit gibt nach [23] die Formel:

$$\text{Gießzeit [s]} = 0,97 \cdot \sqrt{\text{Gießgewicht [kg]}} \quad (4)$$

Hieraus lässt sich mit Hilfe der empfohlenen Einheitsgießleistung von 1,1 kg/(cm<sup>2</sup> · s) der Gesamtquerschnitt der Anschnitte berechnen. Da austenitisches Gusseisen sich bei der Abkühlung nicht umwandelt, können die Gussstücke bei hoher Temperatur aus den Formen genommen werden, vorausgesetzt, Eigenspannungen führen nicht zum Verzug.

Kernstützen müssen aus artgleichem Werkstoff oder einem austenitischen rostfreien Stahl bestehen, wenn die Gussstücke auf Korrosion beansprucht werden.

Die austenitischen Gusseisensorten haben ein deutlich anderes Erstarrungsverhalten als die un- oder niedriglegierten Gusseisen. Sie haben ein breites Erstarrungsintervall und erstarren ausgesprochen breiartig. Dies gilt besonders für die Sorten mit Kugelgraphit [13, 24]. Das Verhalten ist daher dem von NE-Metallen mit breitem Erstarrungsintervall wie Bronzen ähnlicher als dem üblicher Gusseisen oder Stahlguss. Viele bei normalem Gusseisen mit Kugelgraphit gültige Regeln für die Anschnitt- und Speisertechnik sind hier nicht mehr brauchbar oder können sogar zu Fehlern führen. Das erforderliche Speiservolumen ist größer, und die Speiser sollen einen direkten ferrostatischen Druck ausüben, wobei die Temperaturgradienten so liegen müssen, dass der ferrostatische Druck des Speisers auf die erstarrende Schmelze übertragen wird. Diesem Prinzip sind einige Regeln der üblichen Anschnitt- und Speisertechnik unterzuordnen.

Wo immer auch möglich, sollte von oben gegossen und eine Formfüllung von unten vermieden werden, um auf diese Weise zu einer möglichst gleichmäßigen Temperaturverteilung in der Form zu kommen. Praktische Erfahrungen [13] haben gezeigt, dass eine Speisung von oben bei weitem erfolgreicher und wirksamer ist als das Speisen von der Seite. Das grundlegende Verfahren besteht darin, eine gerichtete Erstarrung in Richtung auf den höchsten metallostatistischen Druck zu fördern, wozu Kokillen oder ein Ausrichten des Guss-

stücks beitragen können. Das Speisen von oben ist nicht immer einfach und erhöht den Aufwand in der Putzerei.

Hinsichtlich der Schwindung verhält sich austenitisches Gusseisen in mancher Beziehung wie hochlegierter Edelstahlguss. Mit einem Schwindmaß von etwa 1,6 bis 1,8 % ist zu rechnen, bei unbehinderter Schwindung können aber auch bis zu 2,2 % auftreten [1, 25]. Für größere Gussstücke aus austenitischem Gusseisen so wie für die Serienfertigung sind daher besondere Modelle notwendig. Bei kleineren Gussstücken in Einzelfertigung können oft die gleichen Modelle wie für unlegiertes Gusseisen mit Kugel- oder Lamellengraphit verwendet werden. Der hohe thermische Ausdehnungskoeffizient vor allem von GJSA-XNiCr20-2 kann bei der Abkühlung zu hohen Eigenspannungen führen.

## 4 Arbeitsschutz

Bei längerem Kontakt mit Nickel oder nickelhaltigen Werkstoffen entsteht bei manchen Menschen eine allergische Hautentzündung (allergische Kontakt-Dermatitis). Die Ursache ist nicht das Metall Nickel, sondern lösliche Nickelsalze, die durch Korrosion mit dem Schweiß gebildet werden. Die Voraussetzung für diese Nickelallergie ist eine vorangegangene Sensitivierung. So gut wie alle bekannten Fälle der Sensitivierung treten als Folge von Piercing oder des Stechens von Löchern für Ohrringe auf, wo billiger beschichteter Modeschmuck in der Wunde korrodiert und lösliche Nickelsalze erzeugt. Beim galvanischen Beschichten wird unter die Edelmetall- oder Chromschicht eine Nickelschicht gelegt, um die Haftung zu verbessern. Bei der Handhabung von austenitischen Gusseisen oder Nickel sollten also Handschuhe getragen werden.

Einatembare Nickel-Verbindungen (lösliche Nickelsalze), und zwar ausschließlich diese, gelten als krebserregend (Kategorie 1). Die gültigen MAK-Werte müssen also beachtet werden, und beim Putzen und Schleifen von austenitischem Gusseisen muss für eine ausreichende Entstaubung gesorgt oder es müssen Staubmasken getragen werden.

Im Rahmen eines Risk Assessment wird zur Zeit (2003/2004) das Gefährdungspotenzial sowohl in Bezug auf die menschliche Gesundheit als auch auf die Umwelt untersucht und bewertet, was sich letztlich in entsprechenden Verordnungen niederschlagen wird.

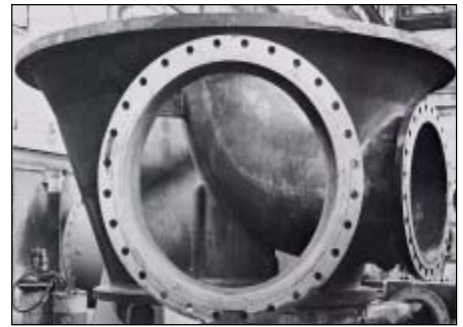


Bild 13: Pumpengehäuse aus GJSA-XNiCr-Nb20-2 für eine Meerwasserentsalzungsanlage (Bild: KSB)

## 5 Schweißen

Das Schweißen hat sowohl als Fertigungs- als auch Konstruktionsschweißen bei den austenitischen Gusseisen Bedeutung. Bei den Sorten mit Lamellengraphit bestehen bei einfachen Fertigungsschweißungen keine größeren Probleme. Die Sorten mit Kugelgraphit sind wegen der höheren Anforderungen an die Schweißnaht und die Wärme beeinflusste Zone (WEZ) schwieriger zu schweißen, aber von der Anwendung her die wichtigeren Werkstoffe.

Viele Sorten des austenitischen Gusseisens mit Kugelgraphit haben eine Neigung zur Bildung von Rissen in der WEZ, was entscheidend von der chemischen Zusammensetzung abhängig ist. Die Verhältnisse wurden bei der wichtigsten Sorte GJSA-XNiCr20-2 eingehend untersucht [26, 27]. Phosphor und Schwefel sind sehr schädlich, während Mangan und vor allem Chrom die Rissneigung vermindern (Bild 4). Die hier geforderten erhöhten Chromgehalte stehen natürlich der Forderung nach gutem Speisungsverhalten und hoher Zähigkeit entgegen. Silicium und Magnesium wirken zusammen ungünstig, und müssen begrenzt werden. Die Formel hierfür lautet [32]:

$$\% \text{ Si} + 75 \% \text{ Mg} \leq 6,3 \quad (5)$$

Eine weitere Verbesserung der Schweiß-eignung kann durch Zusatz von Niob erreicht werden, da es nach Bild 11 einen günstigen Bereich der Zusammensetzung



Bild 14: Turbinengehäuse aus austenitischem Werkstoff (Ni-Resist) mit komplexer Gestalt (Bild: Hacenclever, Battenberg)



gibt. Der optimale Niobgehalt hängt vom Phosphor-, Silicium- und Magnesiumgehalt ab. Aufgrund dieses günstigen Einflusses von Niob wurde eine schweißbare Sorte GJSA-XNiCrNb20-2 entwickelt und in die Norm aufgenommen.

**Tabelle 6** enthält Empfehlungen für Zusammensetzungen, um rissfreie Schweißungen bei dieser Sorte zu erhalten. Zur Vermeidung von Problemen beim Fertigungsschweißen werden diese Begrenzung der Zusammensetzung und das Legieren mit Niob von vielen Gießereien bei größeren Gussstücken routinemäßig durchgeführt, das heißt, es wird statt der Sorte GJSA-XNiCr20-2 die sonst gleichwertige Sorte GJSA-XNiCrNb20-2 geliefert.

### 5.1 Fertigungsschweißen

Für Fertigungsschweißungen wird vor allem das Lichtbogen-Handschweißen angewandt.

Grundsätzlich sollte das Wärmeeinbringen möglichst gering gehalten werden, um eine Versprödung der WEZ durch Carbidbildung, Schwindungsporen und Risse zu vermeiden [27]. Dies bedeutet, dass ohne Vorwärmen geschweißt wird und unter Umständen nach jeder Lage die Schweißnaht bis auf Handwärme abgekühlt werden muss. Nach dieser Vorschrift wurde zum Beispiel eine Reihe von gerissenen Pumpengehäusen einer Meerwasserentsalzungsanlage erfolgreich durch Schweißen repariert. Die Gehäuse wurden nach dem Schweißen spannungsarm gegläht.

Als Schweißzusatzwerkstoffe kommen vor allem handelsübliche Nickel-Eisen-Elektroden mit 60 % Ni in Frage. Manchmal werden auch arteigene oder Reinnickel-Elektroden verwendet. Letztere bringen die höch-

sten Festigkeiten, aber enthalten auch das größte Risiko einer Rissbildung [26]. Bei den Schweißzusatzwerkstoffen verschiedener Hersteller haben sich teilweise erhebliche Unterschiede im Verhalten und bei der Güte der Schweißungen gezeigt.

Für die anderen Sorten gilt bei niedrigsten Phosphor- und Magnesiumgehalten für das Lichtbogen-Handschweißen mit einer geeigneten NiFe-Elektrode folgendes: Für die Sorten mit Lamellengraphit sowie die Sorten GJSA-XNiMn13-7, GJSA-XNiSiCr30-5-5 und GJSA-XNiSiCr-35-5-2 wird empfohlen [2], auf 300 bis 350 °C vorzuwärmen und auch die Zwischenlagentemperatur in diesem Bereich zu halten, um Kaltrisse zu vermeiden. Bei Abgaskrümmern aus GJSA-XNiSiCr-35-5-2 hat sich allerdings inzwischen gezeigt [28, 29], dass auch ohne Vorwärmen reproduzierbar rissfrei geschweißt werden kann.

Die chromfreien beziehungsweise chromarmen Sorten GJSA-XNi22, GJSA-XNiMn23-4, und GJSA-XNi35 sind kaum rissfrei schweißbar. Die bei GJSA-XNiCrNb20-2 geltenden Beschränkungen bei der chemischen Zusammensetzung und der Niobzusatz sind auch hier sinngemäß von Vorteil, aber es wird nicht in allen Fällen gelingen, völlig rissfreie Schweißungen zu erhalten. Sie sollten ohne Vorwärmen geschweißt werden.

Bei größeren Schweißarbeiten kann ein Puffern der Nahtflanken empfehlenswert sein, um Risse zu vermeiden.

Als weitere Schweißverfahren kommen das WIG- und MIG-Verfahren in Betracht, während das Gasschweißen wegen des hohen Wärmeeinbringens weniger empfehlenswert ist. Nach dem Schweißen ist oft je nach Art der Gussstücke und Umfang

**Tabelle 6: Empfehlungen für Zusammensetzungen, um rissfreie Schweißungen bei der Sorte GJSA-XNiCrNb20-2 zu erhalten [32]**

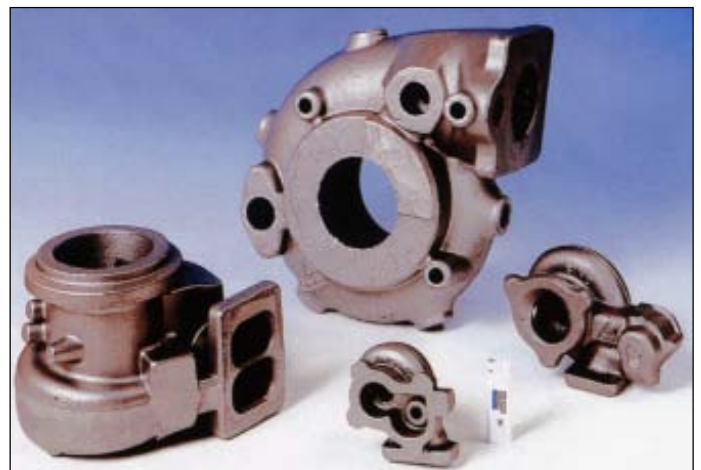
GJSA-XNiCrNb20-2		
Chemisches Element	Niedriger P-Gehalt	Normaler P-Gehalt
	[Massen-%]	
C <sub>ges</sub>	2,5 – 3,0	
Si	1,5 – 2,2	
Mn	1,0 – 1,5	
Cr	2,0 – 2,5	
Ni	19,0 – 22,0	
Mg	≤ 0,080	≤ 0,05
P	≤ 0,025	≤ 0,04
Nb	0,06 – 0,11	0,12 – 0,17

der Schweißarbeiten ein Spannungsarmglühen bei 650 bis 680 °C oder sogar ein Weich- bzw. Graphitisierungsglühen bei 950 bis 1050 °C empfehlenswert. Letzteres soll die in der Schmelz- und Wärmeeinflusszone gebildeten Carbide auflösen.

Bei Verbindungen von austenitischen Gusseisen mit rostfreien Stählen kann eine Kohlenstoffdiffusion vom Gusseisen in den Stahl auftreten, die dort zum Ausscheiden von Chromcarbiden führt, wodurch nicht nur das Gefüge versprödet, sondern vor allem aufgrund der Abbindung des Chroms die Korrosionsbeständigkeit verloren geht. Eine Wärmebehandlung verschlimmert diesen Zustand. Bei hitzebeständigen Bauteilen wie Abgaskrümmern haben sich solche Verbindungen aber bewährt, da die Zunderbeständigkeit ausreicht [28, 29]. Es wurden Dehnungsglieder in Abgaskrümmern eingeschweißt, gegossene Flansche mit Edelstahlrohren zu Abgaskrümmern verbunden und Verbindungen zwischen gegossenen Abgaskrümmern oder Turboladergehäusen und aus ferritischen Stählen bestehenden Katalysatorgehäusen hergestellt.



**Bild 15: Teile für ein optisches Präzisionsinstrument für den Einsatz im Temperaturbereich von -25 bis 55 °C aus GJSL-XNi35, die den gleichen Wärmeausdehnungskoeffizienten wie das Glas der Optik haben (Bild: Wolfensberger Bauma (CH))**



**Bild 16: Diverse Turbinengehäuse für den Abgasturbolader eines NKW's aus GJSA-XNiSiCr35-5-2 (links vorn) und GJS-SiMo und GJS-400-15 eines PKW's (Bild: Hasenclever, Battenberg)**



Bild 17: Aus Stahlrohren und Gussflanschen montierter Krümmer aus GJSA-XNiCrNb20-2 (Bild: Monforts, Mönchengladbach)

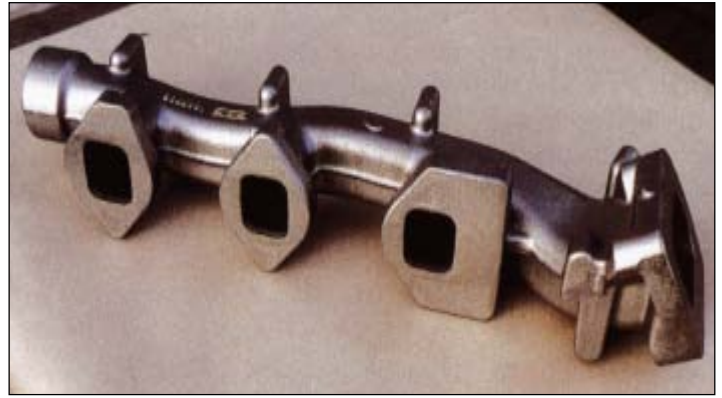


Bild 18: Abgaskrümmer aus GJSA-XNiSiCr35-5-2 für ein Nutzfahrzeug (Bild: Monforts Mönchengladbach)

## 5.2 Konstruktionsschweißen

Beim Konstruktionsschweißen müssen die Zusatzwerkstoffe und das Schweißverfahren besonders sorgfältig ausgewählt und überwacht werden. Die oben erwähnten Begrenzungen bei der Einstellung der chemischen Zusammensetzung müssen beachtet werden und es muss mit Niob legiert werden. Zum Abbau der spröden Carbide sollte, wenn immer möglich, nach dem Schweißen graphitisierend geglüht werden. Wenn wie auf Baustellen nicht geglüht werden kann, ist ein Puffern der Flanken mit Nickel-Eisen-Elektroden und nachfolgendes Glühen der Einzelteile vor dem Zusammenschweißen ein Ausweg. Allerdings ist die Festigkeit geringer als bei der Verwendung artgleicher Elektroden. Wichtig ist, dass die Gussstücke im Bereich der Schweißnähte ein dichtes und einschlusssfreies Gefüge haben, da Risse bevorzugt von Poren und Einschlüssen ausgehen.

## 5.3 Reibschweißen

Versuche, artgleiche Reibschweißverbindungen herzustellen, verliefen bei den Sorten GJSA-XNiSiCr35-5-2, GJSA-XNiMn23-4, GJSA-XNiCr20-2, GJLSA-XNiCuCr15-6-2 sowie GJSA-XNi35 erfolgreich [30]. Es wurden an Rohr- und Vollkörpern Verbindungen mit guten bis ausreichenden mechanischen Eigenschaften und guter Korrosionsbeständigkeit erhalten. Die plastische Verformbarkeit konnte durch eine Wärmenachbehandlung noch verbessert werden. Auch Schweißverbindungen zwischen verschiedenen Gusseisensorten untereinander sind möglich. Ebenso bieten Reibschweißverbindungen von GJSA-XNiCr20-2 mit Ck 22 keine besonderen Probleme und erreichen vor allem nach einer Wärmebehandlung gute Zähigkeits-eigenschaften. Bei Reibschweißverbindungen mit rostfreiem Stahl traten allerdings trotz der kurzen Schweißzeit ähnliche Probleme wie bei üblichen Schmelzschweißverbindungen auf.

## 6 Wärmebehandlung

Die austenitischen Gusseisen sind voll austenitisch und umwandlungsfrei. Daher ist auch ein Härten oder Vergüten wie bei Stahl nicht möglich. Dennoch lassen sich die Eigenschaften in gewissen Umfang durch Wärmebehandlungen beeinflussen.

### 6.1 Spannungsarmglühen

Restspannungen, die vom Guss oder von der Bearbeitung herrühren, werden durch Spannungsarmglühen mit 1 h je 25 mm Wanddicke bei 620 bis 680 °C und Luft- oder Ofenabkühlung bei höchstens 100 K/min auf 200 °C und anschließender Luftabkühlung beseitigt. Ein Erwärmen auf 480 °C beseitigt etwa 60 % der Spannungen, ein Glühen bei 680 °C etwa 95 %. Je nach Einsatzzweck und Art des Gussstücks kann das Spannungsarmglühen nach dem Gießen zum Vermeiden von Verzug beim Bearbeiten oder Schweißen und nach dem Bearbeiten zum Abbau von Bearbeitungsspannungen oder doppelt erfolgen. Es ist besonders angebracht, wenn die Gussstücke gegen Spannungsrisskorrosion in warmen Meerwasser oder Salzlösungen beständig sein sollen.

Geschweißte Gussteile sollten ebenfalls, wenn möglich, spannungsarm geglüht werden. Das Spannungsarmglühen beeinflusst Zugfestigkeit, Dehngrenze, Härte und Dehnung nur wenig, wengleich in einigen Fällen ein merklicher Abfall der Dehngrenze beobachtet wurde.

### 6.2 Weichglühen

In dünnen Querschnitten, unter Kokillen oder bei höheren Chromgehalten kann die Carbiddbildung so stark sein, dass die Härte zu hoch und die Zähigkeit zu tief liegt oder beim Einsatz unter erhöhter Temperatur ein Verzug durch Carbidzerfall zu befürchten ist. Anzeichen für eine übermäßige Carbiddbildung sind meist eine Brinellhärte über 190 Einheiten und eine Dehnung unter 10 %. Durch ein Weichglühen von 0,5 bis 1 h

bei 950 bis 1040 °C mit Luft- oder Ofenabkühlung kann eine günstigere Form und Verteilung sowie ein teilweises Auflösen der Carbide erreicht werden. Bei den Sorten < 4 % Cr sinkt die Härte auf 180 HB und weniger, und bei den Sorten mit Kugelgraphit werden Zugfestigkeit und Dehnung verbessert, während die 0,2%-Dehngrenze etwas abfällt.

GJSA-XNiMn23-4 muss zum Beseitigen von Mangancarbiden 4 h + 1 h je 25 mm Wanddicke bei 900 bis 950 °C mit anschließender Luftabkühlung geglüht werden.

### 6.3 Stabilisierungsglühen

Wenn ein Verzug während des Betriebes bei erhöhten Temperaturen auf jeden Fall verhindert werden soll, kann ein Stabilisierungsglühen vorgenommen werden. Diese Wärmebehandlung besteht aus mindestens 2 h bei 870 °C mit Ofenabkühlung auf 540 °C und anschließender langsamer Luftabkühlung.

Die Sorten mit erhöhtem Siliciumgehalt wie GJSA-XNiSiCr35-5-2 enthalten im Gusszustand ein Silicid-Eutektikum. Beim Glühen oberhalb von 980 °C kommt es zu einer Homogenisierung des Gussgefüges, bei der es sich teilweise auflöst. Dadurch werden die Dehnung erhöht und die Bearbeitbarkeit verbessert.

### 6.4 Abschrecken von hoher Temperatur

Durch ein Abschrecken von hoher Temperatur, das einem Normalisieren entspricht, lassen sich die Festigkeitswerte bei gleichzeitig geringem Härteanstieg erhöhen. Die Gussteile werden von 930 bis 1000 °C an Luft aber auch in Öl oder Wasser abgeschreckt.

Dabei wird Kohlenstoff im Austenit gelöst und beim Abschrecken in Lösung gehalten, wodurch die Festigkeit des Austenits erhöht wird. Es treten keine Umwandlungsspannungen auf, aber es entstehen erhebliche Eigenspannungen.

## 7 Spanende Bearbeitung 8 Korrosionsverhalten

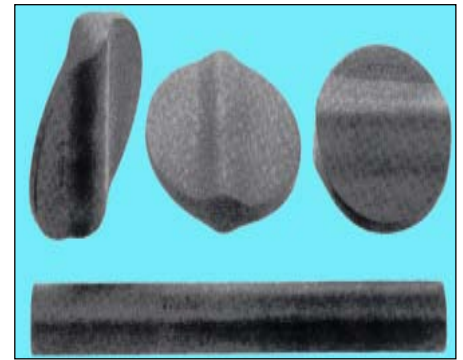
Austenitisches Gusseisen lässt sich auf Grund des zähen Austenits schwerer bearbeiten als unlegiertes Gusseisen mit Kugelgraphit, jedoch dank des Graphitanteils wesentlich leichter als austenitischer Stahl. Die Bearbeitbarkeit hängt weitgehend von der chemischen Zusammensetzung der jeweiligen Sorte ab.

Die Sorten mit Kugelgraphit liegen in ihrer Bearbeitbarkeit etwa zwischen feinkörnigem perlitischem Gusseisen mit einer Härte von 220 HB und austenitisch-ferritischem Gusseisen mit einer Härte von 300 HB. Die chromlegierten Sorten enthalten je nach Chromgehalt mehr oder weniger Carbide, die nach Menge und Ausbildung die Bearbeitbarkeit beeinflussen. Ein Weichglühen führt zu ihrem teilweisen Auflösen oder Verfeinern und erleichtert die Bearbeitung.

Austenitisches Gusseisen sollte auf möglichst stabilen Werkzeugmaschinen mit kräftigen Werkzeugen bearbeitet werden. Die **Tabelle 7** enthält Richtwerte für das Drehen, **Tabelle 8** für das Fräsen, Bohren, Reiben und Gewindebohren.

Das Korrosionsverhalten von austenitischem Gusseisen ist anders als bei korrosionsbeständigen Stählen. Bei diesen Edelstählen beruht die Korrosionsbeständigkeit auf der Bildung einer Passivschicht durch den im Gefüge gelösten Chromgehalt von mindestens 12 % Nickel und andere Legierungselemente wirken sich erst in höheren Gehalten als bei den üblichen Stahlsorten vom Typ 18Cr9Ni aus. Bei den austenitischen Gusseisen reicht der Chromgehalt nicht zur Bildung einer Passivschicht aus, sondern die Beständigkeit beruht auf der inhärenten Beständigkeit der nickelhaltigen Grundmasse oder der Bildung von Schutzschichten aus Korrosionsprodukten. An der Schutzschichtbildung sind dann alle weiteren Legierungselemente beteiligt, allen voran Chrom. Mit steigenden Gehalten an Nickel und Chrom nimmt die Beständigkeit daher in den meisten Fällen zu.

Die Oberfläche von Gussstücken aus austenitischem Gusseisen bleibt auch an Luft aus diesem Grund unter Korrosionseinfluss nicht dauerhaft silbrig-metallisch



**Bild 19: Drosselklappen und Führungsstange für die Motorbremse in einer NKW-Abgasleitung aus GJSA-XNiCr20-2 (Bild: Schubert & Salzer)**

glänzend und blank wie ein Edelstahl, sondern überzieht sich mit einer Art Patina. Dies ist kein Werkstofffehler, sondern für diesen Werkstoff typisch.

Zusammenstellungen von Korrosionsraten in verschiedenen Medien enthalten die Veröffentlichungen [1 bis 3].

Austenitisches Gusseisen steht in der Anwendung im Wettbewerb zu rostfreiem Stahlguss und teilweise zu Nickelbasis-

**Tabelle 7: Richtwerte für die Schnittgeschwindigkeit beim Drehen einiger austenitischer Gusseisen mit Kugelgraphit [31, 32]**

Werkstoff (Härte)	Spanungsquerschnitt		Schneidstoff  S=Schnellarbeitsstahl <sup>1)</sup> M K= Hartmetall <sup>2)</sup>	Wirkwinkel [Grad]				Messwerte [m/min] <sup>3)</sup>			Empfohlene Schnittgeschwindigkeit [m/min]	
	Schnitttiefe etwa [mm]	Vorschub bis [mm/U]		Freiwinkel äe	Spanwinkel äe	Neig.winkel ëe	Einstellwinkel êe	Verschleißkriterium			mit Randzone	ohne Randzone
								VB 0,4	VB 0,6	KQ,3		
GJSA-XNiCr20-2 (140 bis 200 HB30)	1,0	0,1	S 10-4-3-10 M 10, K 10, M 15	6 - 10	6 - 12	0 - 4	45 - 90					20 - 15 70 - 40
	3,0	0,3	S 10-4-3-10 M 10, M 15, K 10	6 - 10	6 - 12	0 - 4	45 - 90	55	70	80	40 - 25	18 - 11 60 - 30
	6,0	0,6	M 15, K 10, M 10	6 - 8	6	0 - 4	45 - 75	35 <sup>4)</sup>	50		35 - 20	50 - 25
GJSA-XNiCr20-2 (150 bis 255 HB30)	1,0	0,1	S 10-4-3-10 M 10, K 10, M 15	6 - 10	6 - 12	0 - 4	45 - 90	66				15 - 8 50 - 35
	3,0	0,3	S 10-4-3-10 M 10, K 10, M 15	6 - 10	6 - 12	0 - 4	45 - 90	35	40	50 - 70	35 - 20	12 - 6 45 - 20
	6,0	0,6	M 15, M 20, K 10	6 - 8	6 - 0	0 - 4	45 - 75	20 - 35	20 - 30	30 - 48	25 - 15	30 - 15
GJSA-XNiSiCr30-5-5 (170 bis 250HB30)	1,0	0,1	M 10, K 10, K 05 <sup>5)</sup>	6	6	0 - 4	45 - 75	55		30 - 40	30 - 15	40 - 25
	3,0	0,3	M 10, K 10, M 15 <sup>5)</sup>	6	6	0 - 4	45 - 75	≤ 40	≤ 50	~ 35		35 - 15
	6,0	0,6	M 15, M 20, K 10	6	6 - -6	0 - 4	45 - 75	≤ 15	≤ 20		20 - 12	16 - 10
GJSA-XNiMn23-4 (150 bis 180 HB30)	1,0	0,1	M 10, K 10, K 05 <sup>5)</sup>	6 - 10	6 12	0 - 4	45 - 90					70 - 40
	3,0	0,3	M 10, K 10, M 15 <sup>5)</sup>	6 - 10	6 12	0 - 4	45 - 90	20 - 30	30 - 40	60 - 75	50 - 25	60 - 30
	6,0	0,6	M 15, M 20, K 10	6 - 8	6	0 - 4	45 - 75	20 - 30	25 - 35	40 - 50	40 - 20	50 - 25

<sup>1)</sup> Schnellarbeitsstahl nach Stahleisen-Werkstoffblatt 320-69

<sup>2)</sup> Zerspanungsanwendungsgruppe nach DIN 4990

<sup>3)</sup> Stundenschnittgeschwindigkeit V60, Kernzone

<sup>4)</sup> Mit Randzone

<sup>5)</sup> Auch S 10-4-3-10

legierungen. Es besitzt keine Gebrauchseigenschaften, die sich mit entsprechenden Stahlgussorten nicht auch in gleichem oder sogar höherem Maße erreichen lassen. Die Vorteile von Ni-Resist sind im Wesentlichen die Vorteile eines Gusseisens gegenüber Stahlguss, nämlich die kostengünstigere Fertigung der Bauteile, wie sie in den modernen Industrieländern zu einer Verdrängung von unlegiertem Stahlguss durch unlegiertes Gusseisen mit Kugelgraphit geführt haben.

Die flächigen Korrosionsraten von austenitischen Gusseisen sind allgemein höher als bei korrosionsbeständigen Stählen. Andererseits besteht aber keine Gefahr, dass die dünne Passivschicht durchbrochen wird und es zu den bei rostfreiem Stahl so gefürchteten lokalen Korrosionsangriffen wie Lochfraß- oder Spaltkorrosion kommt.

Die Graphitform hat praktisch keinen Einfluss auf das Korrosionsverhalten, so dass die entsprechenden Sorten mit Lamellen- und Kugelgraphit sich gleichartig verhalten. Die älteren Versuchsergebnisse an austenitischen Gusseisen mit Lamellengraphit gelten also auch für die heute aus Festigkeitsgründen bevorzugten Sorten mit Kugelgraphit. Ein Unterschied besteht zwischen den kupferhaltigen und den kupferfreien Sorten mit Lamellen- und Kugelgraphit mit 15 % Ni und 6 % beziehungsweise 20 % Ni in schwachen Säuren, wo Kupfer die Beständigkeit erhöht, so dass dort die Sorte mit Lamellengraphit GJLA-XNiCuCr15-6-2 etwas besser beständig als die Sorte GJSA-XNiCr20-2 sein kann.

Die bei Korrosionsbeanspruchung häufigste Sorte ist GJSA-XNiCr20-2 beziehungs-

**Tabelle 8: Richtwerte für die Schnittgeschwindigkeit beim Fräsen, Bohren, Reiben und Gewindebohren von austenitischen Gusseisen [31, 32]**

Werkstoff	Schnittgeschwindigkeit für Werkzeuge in [m/min]					
	Fräsen		Bohren	Reiben	Gewindebohren	
	Schnellarbeitsstahl	Hartmetall		Schnellarbeitsstahl	Hartmetall	Schnellarbeitsstahl
GJLA-XNiCr20-2	24 - 18	85 - 60	24 - 18	20	30	17 - 12
GJLA-XNiCr20-3	23 - 12	75 - 50	18 - 14	12	21	12 - 9
GJSA-XNiCr20-2	12 - 7	55 - 30	12 - 9	9	18	9 - 8
GJSA-XNiCr20-3	9 - 6	35 - 25	11 - 6	6	15	8 - 5

weise die schweißgeeignete Sorte GJSA-XNiCrNb20-2 mit 1 bis 2 % Cr. Bei höheren Anforderungen an die Erosionsbeständigkeit oder die Festigkeit kann der Chromgehalt auf 2,5 bis 3,5 % erhöht werden, aber mit Abstrichen an Zähigkeit, Bearbeitbarkeit und Gießigenschaften.

Die Sorte mit Lamellengraphit GJLA-XNiCuCr15-6-2 ist heute weitgehend durch die duktilere und festere Sorte GJSA-XNiCr20-2 verdrängt, obwohl sie in Fällen, wo keine oder nur geringe mechanische und dynamische Belastungen auftreten, eine kostengünstige Alternative darstellt.

Wenn zusätzlich zur Korrosionsbeständigkeit besonders hohe Zähigkeit bis zu niedrigen Temperaturen oder Nichtmagnetisierbarkeit gefordert werden, wird die Sorte GJSA-XNiCr22 eingesetzt. Sie ist allerdings etwas weniger korrosionsbeständig und fest sowie schlechter gießbar als die GJSA-XNiCr20-2.

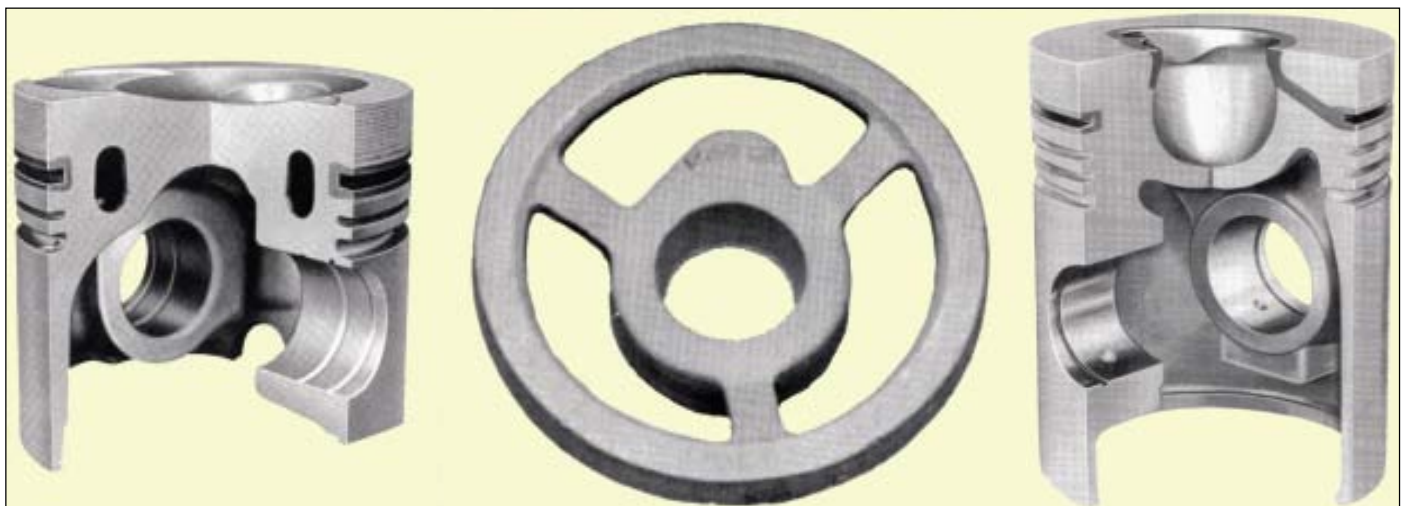
Die Sondersorten GJSA-XNiCr30-3 und GJSA-XNiCr30-5-5 werden bei besonderen Korrosionsbeanspruchungen verwendet.

## 8.1 Atmosphärische Korrosion

Bei atmosphärischer Korrosion ist austenitisches Gusseisen recht gut beständig, obwohl es sich mit einer Rostschicht überzieht. Diese schützt aber im Gegensatz zum Verhalten von unlegiertem Gusseisen oder Stahl den darunterliegenden Werkstoff vor weiterem Angriff.

Im **Bild 21** wird das Korrosionsverhalten verschiedener Gusseisensorten und von kupferlegiertem Stahl in Meeressphäre verglichen. Die gegenüber den unlegierten Werkstoffen höhere Beständigkeit der austenitischen Gusseisen kommt deutlich zum Ausdruck. Rostfreie Chrom- und Chrom-Nickel-Stähle zeigten hier mit weniger als 0,1 g Gewichtsverlust in neun Jahren zwar praktisch keinen messbaren Angriff, wohl aber Lochfraßbildung. Bei der höher legierten Sorte des austenitischen Gusseisens mit 30 % Ni, 5 % Cr und 5 % Si ist der Gewichtsverlust geringer als bei der Sorte mit 20 % Ni und 2 % Cr. Ähnliche Verhältnisse ergeben sich nach **Tabelle 9** auch in der aggressiveren Industrieluft.

Auch in Schwefelwasserstoff haltiger Atmosphäre bei erhöhten Temperaturen, z. B. in Destillationsabgasen, verhält sich austenitisches Gusseisen sehr günstig.



**Bild 20: Zwei Leichtmetallkolben mit eingegossenem Ringträger (Mitte) aus GJLA-NiCuCr15-6-2 (Ringträger in Bildmitte ist mit Muldenrandarmierung kombiniert und gehört zum rechten Kolben) (Fotos: Mahle, Stuttgart)**

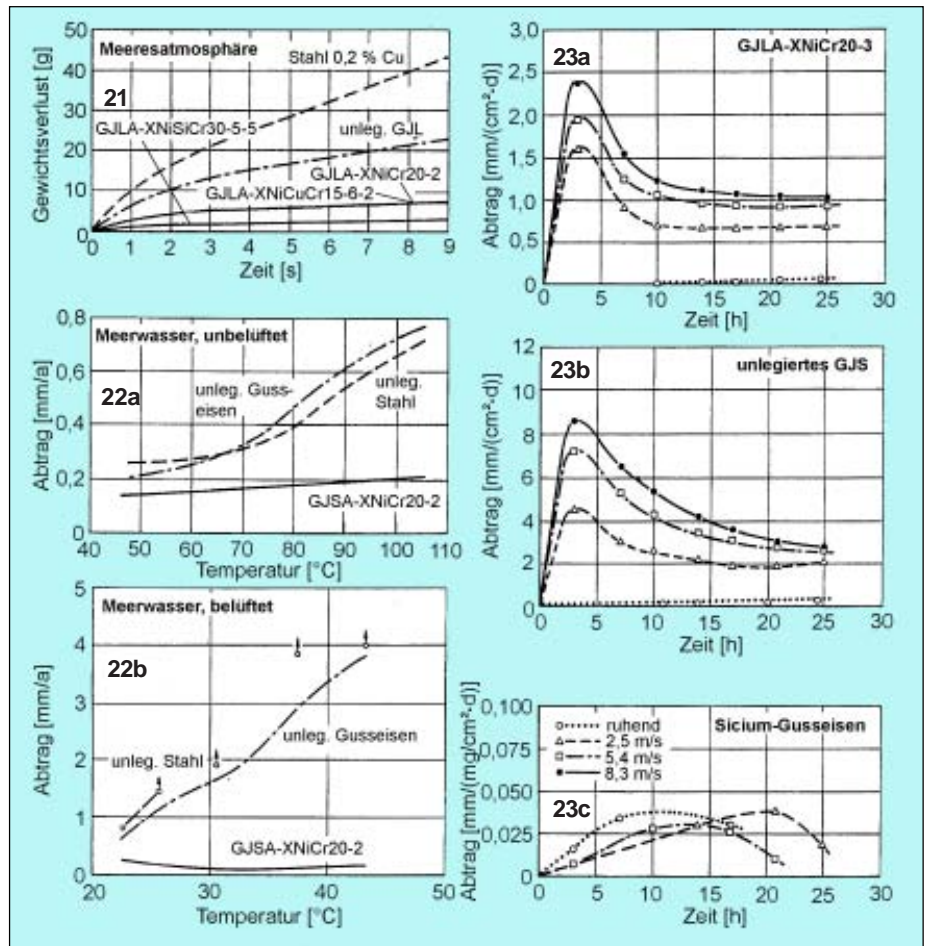
## 8.2 Verhalten in Meerwasser und Salzlösungen

In Meerwasser ist die Beständigkeit von austenitischem Gusseisen deutlich besser als die von unlegiertem Gusseisen oder Stahlguss. Das gleiche gilt auch für gechlortes Meerwasser. Die Ergebnisse von Auslagerungsversuchen an der englischen Nordseeküste sind in der **Tabelle 10** zusammengestellt. Die Proben befanden sich im Bereich des Tidenhubs, so dass sie bei Ebbe jeweils zweimal für ein bis drei Stunden der Luft ausgesetzt waren. Dies ergibt höhere Korrosionsgeschwindigkeiten als ein kontinuierliches Tauchen. Die Überlegenheit der austenitischen Gusseisensorten im Vergleich zu unlegiertem Gusseisen wird mit steigender Strömungsgeschwindigkeit größer, wie aus **Tabelle 11** ersichtlich ist. Auch die Zunahme der Korrosion mit steigender Temperatur ist äußerst gering (**Bild 22**).

In stark bewegtem Wasser, wie sie in Pumpen auftreten, wird die Beständigkeit gegen die Hydro-Erosion durch einen erhöhten Chrom- und damit Carbidgehalt zum Teil erheblich verbessert, wie sich bei Steigerung des Chromgehalts vom GJLA-NiCuCr15-6-2 von 2 auf 3 % zeigte [35].

Im stark verschmutzten und salzreichen Wasser des arabischen Golfs wurden bei einer Normaltemperatur von 28 °C Vergleichsuntersuchungen zur Erosions-Korrosionsbeständigkeit von unlegiertem ferritischen Gusseisen mit Kugelgraphit, Siliciumguss mit 14,5 % Si, austenitischem Gusseisen mit Lamellengraphit GJLA-XNiCr20-2 mit 3 % Cr und Duplex-Stahlguss ähnlich GX3CrNiMo26-6-3 mit abgesenktem Mangangehalt nach dem Verfahren der rotierenden Scheibe durchgeführt [36]. Der Duplex-Stahlguss zeigte in der Versuchsdauer von 25 Tagen keinen messbaren Angriff.

Die Abtragsraten der drei Gusseisensorten sind im **Bild 23** gegenübergestellt. In ruhendem Wasser ist der Abtrag nur gering, während er in strömendem Wasser außer bei Siliciumguss zunächst stark zunimmt, da sich eine Schicht aus Korrosionsprodukten bildet. Mit steigender Einwirkungszeit geht der Abtrag deutlich zurück und der Einfluss der Strömungsgeschwindigkeit wird geringer. Das austenitische Gusseisen ist rund zehnmal beständiger als das unlegierte Gusseisen mit Kugelgraphit. Das Silicium-Gusseisen zeigt dank seiner Härte von 470 HV und der dichten SiO<sub>2</sub>-Schicht den geringsten Angriff, der zudem mit steigender Strömungsgeschwindigkeit zurückgeht und bei 8,3 m/s nicht mehr messbar war. Andererseits trat in ruhendem Wasser Lokalkorrosion ähnlich wie bei



**Bild 21.** Korrosion verschiedener Gusseisensorten und von kupferlegiertem Stahl in der Meeresatmosphäre am Strand von North Carolina (USA) in 240 m Entfernung vom Meer [33]

**Bild 22.** Einfluss der Temperatur auf die Korrosion von austenitischem Gusseisen GGG-NiCr 20 2, unlegiertem Stahl und unlegiertem Gusseisen in unbelüftetem (a) und belüftetem (b) Meerwasser bei einer Versuchsdauer von jeweils 156 Tagen [1]

**Bild 23.** Abtragsraten dreier Gusseisensorten in strömendem Seewasser des arabischen Golfs bei 28 °C in Abhängigkeit von der Strömungsgeschwindigkeit und der Versuchsdauer [36]

a Siliciumguss mit 14,5 % Si, Härte 471 HV

b Gusseisen mit Kugelgraphit, Härte 133 HV

c Austenitisches Gusseisen mit Lamellengraphit GJLA-XNiCr20-3 mit 3 % Cr, Härte 134 HV

**Tabelle 9:** Korrosion von austenitischem Gusseisen in Industrieluft und am Meer [33]

Werkstoff	Versuchsdauer [a]	Industrieatmosphäre				Meeresatmosphäre <sup>1)</sup>
		Ungeschützt		Überdacht		Abtragung [mm/a]
		Abtragung [mm/a]	Grübchentiefe [mm]	Abtragung [mm/a]	Grübchentiefe [mm]	
GJLA-XNiCuCr15 6 2	8	0,006		0,009		0,003
	23	0,004	0,25	0,007	0,15	
GJSA-XNiCr20-2	8	0,005		0,005		0,003
	23	0,003	0,19	0,004	0,13	
GJLA-XNiSiCr 30 5 5	8	0,003		0,003		0,001
	23	0,002	0,07	0,003	0,04	

<sup>1)</sup> 240 m vom Ufer entfernt, Versuchsdauer 15 a

**Tabelle 10: Mittlere Korrosionsgeschwindigkeiten und Reihenfolge der Lochfraßbeständigkeit verschiedener Gusseisensorten bei zehnjähriger Auslagerung an der englischen Küste im Bereich des Tidenubs [34]**

Werkstoff	Abtrag [mm/a]	Lochkorrosion <sup>1)</sup>
Gusseisen mit Lamellengraphit, unlegiert	0,05 – 0,07	3
Gusseisen mit Kugelgraphit, unlegiert	0,06	4
Gusseisen mit Kugelgraphit, 1 % Ni	0,05 – 0,06	7 - 8
Weißer Temperguss	0,05 – 0,07	8 – 10
Schwarzer Temperguss	0,05 – 0,06	5 – 8
Weißes Gusseisen, unlegiert	0,050	9
15%iges Siliciumgusseisen	0,001	4
30%iges Chromgusseisen	0,001	7
Austenitisches Gusseisen (GJLA-XNiCuCr15-6-2)	0,003	1

<sup>1)</sup> 1 – sehr beständig, 10 – gering beständig

**Tabelle 11: Abtragsraten von austenitischem und unlegiertem Gusseisen in Meerwasser mit verschiedenen Bewegungszuständen [34]**

Medium	Unlegiertes Gusseisen	Austenitisches Gusseisen GJLA-XNiCuCr15-6-2 GJSA-XNiCr20-2
	Abtragung [mm/a]	
Ruhendes Meerwasser	0,07 – 0,53	0,02 – 0,06
Langsam bewegtes Meerwasser 740 d, v = 1,5 m/s	1,27	0,05
Fließendes Meerwasser 58 d in Kondensatorkammer, 70 – 80 °C	1,00	0,25
Bewegtes Meerwasser 394 d, Probe abwechselnd an Luft und in Wasser getaucht	0,25	0,05
Werkstoff	Temperatur	
	24 °C	38 °C
Abtragung [mm/a]		
Starke Bewegung (8,2 m/s)		
Unlegiertes Gusseisen mit Lamellengraphit	0,86	2,60
Unlegiertes Gusseisen mit Kugelgraphit	1,19	2,87
Unlegierter Stahl	1,83	6,60
GJLA-XNiCuCr15-6-2	0,26	0,58
Sehr starke Bewegung (41,2 m/s)		
Unlegiertes Gusseisen	13,50	-
GJLA-XNiCuCr15-6-2	1,07	-

**Tabelle 12: Verhalten von austenitischem Gusseisen und korrosionsbeständigem Stahl gegenüber Lochfraß in Meerwasser [34]**

Werkstoff	Flächige Abtragung [mm/a]	Widerstand gegenüber Lochkorrosion	Typische Lochkorrosionsgeschwindigkeit [mm/a]
AISI 304 L (X2CrNi18-9)	<sup>1)</sup>	gering	1,78
AISI 316 (X5CrNiMo18-10)	<sup>1)</sup>	mäßig	1,78
GJLA-XNiCuCr15-6-2	0,051 – 0,076	gut	0,051 – 0,1

<sup>1)</sup> Keine Angaben

sensibilisierten rostfreien Stählen auf. Wegen der Sprödigkeit und schlechten Bearbeitbarkeit dürfte dieser Werkstoff zudem für die meisten Anwendungen kaum in Frage kommen.

In mäßig bewegtem Meerwasser zeigen austenitische Stahlgussorten vom Typ 18Cr9Ni praktisch keinen Korrosionsverlust, sind jedoch in ruhendem Meerwasser gegen Lochfraßkorrosion anfällig.

**Tabelle 12** enthält einige Versuchsergebnisse. Auch das Legieren des Stahls mit 2,5 % Mo reicht hier nicht aus, um den Stahl beständig zu machen. Die gewünschte Lochfraßbeständigkeit kann erst von den höher legierten Super-Austeniten oder Super-Duplex-Stählen erreicht werden. Eine der wichtigsten Anwendungen von austenitischem Gusseisen sind daher Bauteile von Anlagen und Maschinen, die

mit Meerwasser, Brackwasser, verunreinigtem Flusswasser und konzentrierten Salzsolen in Berührung kommen. Gussstücke dieser Art sind Gehäuse und Ansaugrohre für Meerwasserpumpen, die als Feuerlöschpumpen auf Off-Shore-Anlagen, Kühlwasserpumpen oder Förderpumpen für Meerwasserentsalzungsanlagen dienen. Die Laufräder, die höheren spezifischen mechanischen Belastungen ausgesetzt sind, werden aus korrosionsbeständigem Stahlguss hergestellt.

Bei Verwendung von austenitischen Gusseisensorten in Verbindung mit anderen Werkstoffen in Meerwasser ist wegen dessen hoher Leitfähigkeit auf galvanische Einflüsse zu achten, die zu galvanischer Korrosion führen können. Einen Anhalt für die Möglichkeit galvanischer Korrosion gibt die Rangfolge verschiedener Werkstoffe in fließendem Meerwasser in **Tabelle 13**. Die weiter oben stehenden Werkstoffe verhalten sich jeweils unedler, werden zuerst angegriffen und schützen so die darunter Angeordneten. Je größer der Abstand ist, desto stärker ist der Korrosionsangriff. Aus diesen qualitativen Angaben ist zu entnehmen, dass die Kombinationen unlegiertes Gusseisen/austenitisches Gusseisen und austenitisches Gusseisen/Kupferbasislegierungen viel weniger der galvanischen Korrosion ausgesetzt sind als zum Beispiel die Kombination unlegiertes Gusseisen/Kupferbasislegierungen.

Dies spielt bei Pumpen und Ventilen eine Rolle, wo oft Werkstoffpaarungen verwendet werden. Es ist beispielsweise günstiger, in ein Ventilgehäuse aus unlegiertem Gusseisen eine Spindelführung aus austenitischem Gusseisen statt aus Bronze einzubauen. Hierdurch wird die Korrosion des Gehäuses deutlich vermindert.

Oft wird jedoch ein stärkerer Abtrag des Gehäuses in Kauf genommen, um stärker beanspruchte Einbauteile in Ventilen wie Führungsbüchsen oder Teller zu schützen. Bei der Konstruktion muss darauf geachtet werden, dass bei solchen Werkstoffpaarungen die Fläche des unedleren Werkstoffs stets wesentlich ausgedehnter als die des Edleren ist. Aus **Tabelle 14** kann entnommen werden, bei welchen Werkstoffkombinationen die Einbauteile geschützt sind. In Meerwasserpumpen können die empfindlicheren Laufräder aus korrosionsbeständigem Stahlguss von dem dickwandigen Gehäuse aus austenitischem Gusseisen unter Umständen geschützt werden.

In Salzlösungen haben die austenitischen Gusseisen eine allgemein gute Beständigkeit [1]. Bei der flächigen Korrosion ist austenitischer 18Cr9NiMo-Stahlguss zwar in den meisten Fällen beständiger, aber wie in Meerwasser anfällig gegen Lochfraß.

### 8.3 Spannungsrissskorrosion

Die Kombination von Korrosion und mechanischen Spannungen kann vor allem in Salzlösungen und Meerwasser zu Spannungsrissskorrosion führen. Sie ist ein häufiger Schadensfall bei austenitischen Edeltählen. Lange Zeit wurden die austenitischen Gusseisen für nicht durch Spannungsrissskorrosion gefährdet angesehen. Schadensfälle an Gehäusen von Großpumpen in Meerwasserentsalzungsanlagen im Mittleren Osten sowie Laboruntersuchungen beweisen das Gegenteil [6, 39 bis 43]. Im **Bild 24** ist ein typischer Riss im Gefüge zu sehen.

Im **Bild 25** ist die Beziehung zwischen Spannung und Zeit bis zum Bruch in künstlichem Meerwasser bei einer Temperatur von 33 °C bei GJSA-XNiCr20-2 im Vergleich zu einigen anderen Werkstoffen dargestellt und im **Bild 26** der Einfluss der Temperatur, der Salzkonzentration und des Sauerstoffgehalts beim GJSA-XNiCr20-2 und einer Spannung, die allerdings deutlich oberhalb der 0,2 %-Dehngrenze von 210 bis 250 N/mm<sup>2</sup> für diesen Werkstoff liegt.

In einer anderen Laboruntersuchung [43] wurde der Einfluss der Temperatur und der Höhe der Spannung auf das Auftreten von Spannungsrissskorrosion bei GJSA-XNiCr20-2 und GJSA-XNiCr30-3 in 0,1- bis 40-prozentigen MgCl<sub>2</sub>-Lösungen verfolgt. Als Beständigkeitsgrenze wurde 2 500 h angesetzt. **Bild 27** enthält die Ergebnisse bei MgCl<sub>2</sub>-Konzentrationen von 5, 20 und 40 %. Bei hohen Spannungen kommt es sehr rasch zu Rissen. Am aggressivsten erwies sich eine 10%ige MgCl<sub>2</sub>-Lösung. Austenitische Gusseisen sind nach diesem Bericht aber auch in verdünnten MgCl<sub>2</sub>-

Tabelle 13: Galvanische Reihe verschiedener Werkstoffe in fließendem Meerwasser <sup>1)</sup>[37]

Magnesium Zink AlMn AlMgSi1 AlMgSi0,5 AlMg2 Unlegierter Stahl Niedriglegierter Stahl Unlegiertes Gusseisen 13%iger Cr-Stahl, aktiv 17%iger Cr-Stahl, aktiv CrNi-18/8-Stahl, aktiv	CrNiMo-18/8/3-Stahl, aktiv Austenitisches Gusseisen CuZn40 CuZn30 CuZn39Sn CuZn20Al CuZn15 Kupfer CuAl10Fe CuSn77nPb CuNi10Fe	CuNi30Fe CuNi30Fe2Mn Nickel NiCr15Fe Silber 13%iger Cr-Stahl, passiv 17%iger Cr-Stahl, passiv CrNi-18/8-Stahl, passiv CrNiMo-18/8/3-Stahl, passiv NiCr30Fe NiCr20Mo15 Titan
--	---	--

<sup>1)</sup> Die weiter oben stehenden Werkstoffe verhalten sich jeweils unedler, werden zuerst angegriffen und schützen so die darunter stehenden

Tabelle 14: Galvanische Verträglichkeit von Werkstoffkombinationen für Gehäuse und Einbauteile von Pumpen und Ventilen in Meerwasser [38]

Gehäusewerkstoff	Einbauteile aus		
	CuSn(Zn)-Legierungen	NiCu30Fe	NiCu30Fe
Unlegiertes Gusseisen Austenitisches Gusseisen CuSn(Zn)-Legierungen CuNi30Fe NiCu30Fe	werden geschützt werden geschützt unterschiedliches Verhalten <sup>1)</sup> unbefriedigendes Verhalten	werden geschützt werden geschützt werden geschützt neutrales Verhalten	werden geschützt werden geschützt werden geschützt neutrales Verhalten
Alloy 20(NiCrCuMo-29/20/3/2-Stahl)	unbefriedigendes Verhalten	unterschiedliches Verhalten	unterschiedliches Verhalten

<sup>1)</sup> Üblich sind Einbauteile aus CuSn-Legierungen. Diese können gegenüber dem Gehäuse anodisch werden, wenn sich wegen hoher Strömungsgeschwindigkeit oder Turbulenz keine Schutzschicht auf den Sitzen bilden kann.

<sup>2)</sup> Die Potenziale unterscheiden sich nur wenig: AISI 316 erhält daher keinen ausreichenden kathodischen Schutz gegenüber Loch- und Spaltkorrosion bei geringen Strömungsgeschwindigkeiten.

Lösungen mit Konzentrationen von 0,1 oder 1,0 % bei hohen Spannungen und Temperaturen anfällig gegen Spannungsrissskorrosion. Bei beiden Legierungen gibt es eine ausgesprochene Grenzspannung, wo auch bei hoher Temperatur keine Risse mehr auftreten. Bei GJSA-XNiCr20-2 liegt

sie nach **Bild 27** bei etwa 50 % der Streckgrenze, bei der beständigeren Legierung GJSA-XNiCr30-3 mit höherem Nickelgehalt bei etwa 70 %. Zwischen der Standzeit und dem Durchbruchspotenzial des Werkstoffs wurde eine deutliche Abhängigkeit festgestellt. Eine anodische Polarisation

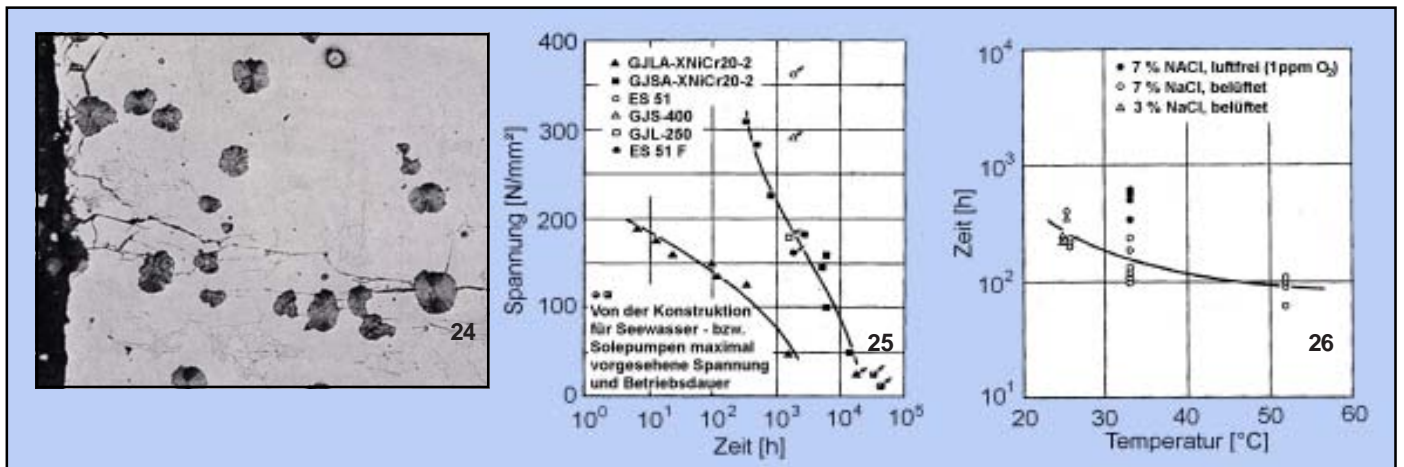
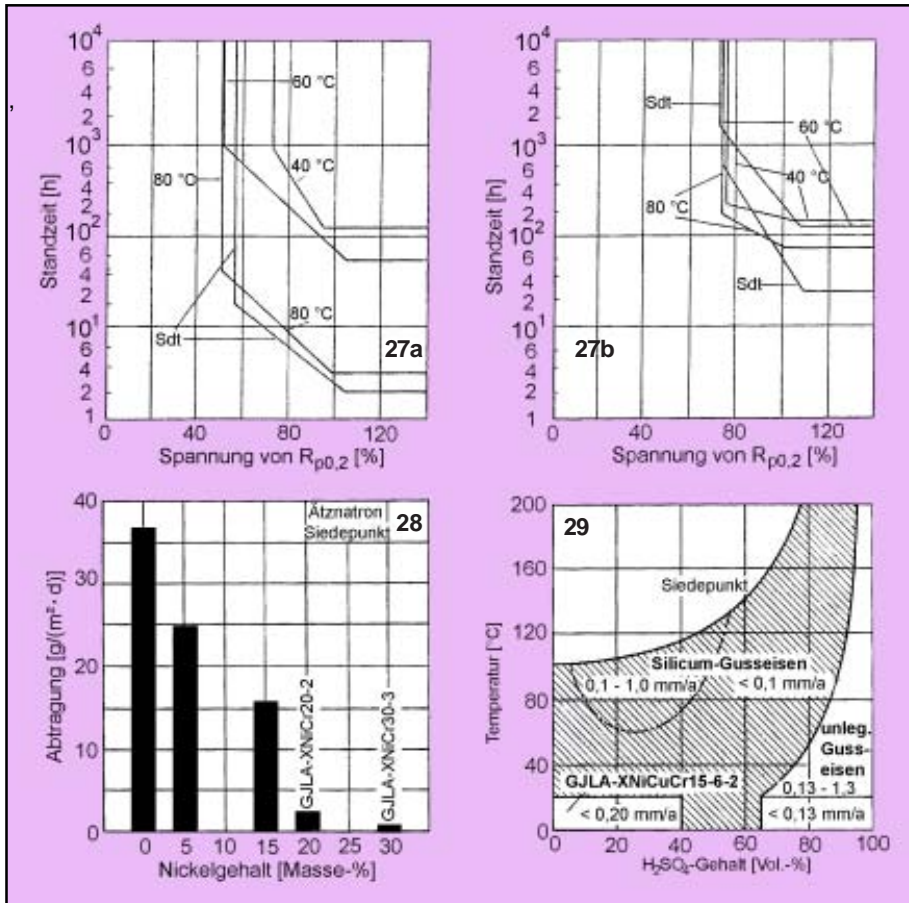


Bild 24. Typischer durch Spannungsrissskorrosion erzeugter Riss im Gefüge von GJSA-XNiCr20-2

Bild 25. Beziehung zwischen Spannung und Zeit bis zum Bruch in künstlichem Meerwasser bei einer Temperatur von 33 °C bei GJSA-XNiCr20-2 im Vergleich zu einigen anderen Werkstoffen [39]

Bild 26. Einfluss der Temperatur, der NaCl-Konzentration und des Sauerstoffgehalts bei GJSA-XNiCr20-2 bei einer Spannung von 340 N/mm<sup>2</sup> auf die Zeit bis zum Bruch [40]



**Bild 27.** Ergebnisse von Untersuchungen an Zugstäben zur Spannungsrissskorrosion an GJSA-XNiCr20-2 (links) und GJSA-XNiCr30-3 (rechts) in 5-, 20- und 40-prozentigen  $MgCl_2$ -Lösungen zwischen 40 °C und Siedetemperatur, Beständigkeitsgrenze 2 500 h [43]

**Bild 28.** Einfluss des Nickelgehalts auf die Korrosion von Gusseisen in 50- bis 60-prozentigem Ätznatron, Versuchsdauer: 81 Tage, Temperatur: Siedepunkt bei 0,9 bar [48]

**Bild 29.** Iso-Korrosionskurven von GJSA-XNiCuCr15-6-2, unlegiertem Gusseisen und Siliciumgusseisen in Schwefelsäure in Abhängigkeit von der Temperatur

senkt die Standzeit, eine geringe kathodische Polarisation erhöht sie oder unterbindet die Spannungsrissskorrosion ganz. Daraus wird gefolgert, dass bei Kontakt von austenitischem Gusseisen mit austenitischem Cr-Ni-Stahl, was in Pumpen mit Stahllaufträgern der Fall ist, die Spannungsrissskorrosion beschleunigt und bei Kontakt mit unlegiertem Stahl oder Gusseisen behindert wird.

Der Anstieg der Zeit bis zum Bruch unterhalb von 30 °C im **Bild 25** deutet darauf hin, dass Spannungsrissskorrosion von austenitischem Gusseisen in unserem Klima äußerst unwahrscheinlich ist. Im Mittleren Osten sind jedoch Wassertemperaturen über 30 °C durchaus normal. Die zur Auslösung der Spannungsrissskorrosion erforderlichen hohen Spannungen liegen weit oberhalb der im Betrieb auftretenden Werte, die nur etwa 35 N/mm<sup>2</sup> betragen sollten. Die höheren Spannungen können aber durch Eigenspannungen im Gussstück erzeugt werden, und tatsächlich waren die im Einsatz gerissenen Gehäuse nicht spannungsarm gegläht.

Als wirksame Maßnahme gegen die Spannungsrissskorrosion wird ein möglichst weitgehender Abbau von Eigenspannungen empfohlen, so dass nach [43] bei GJSA-XNiCr20-2 die Summe aus Eigen- und Betriebsspannung nicht mehr als 100 N/mm<sup>2</sup> und bei GJSA-XNiCr30-3 unter 150 N/mm<sup>2</sup> betragen darf. Durch einen kathodischen Schutz soll sich die Beständigkeit erhöhen lassen [42, 43].

Eine Rolle spielt auch die Güte des Gussstücks und seine Gefügeausbildung. In einem gerissenen Pumpengehäuse wurde ein für GJSA-XNiCr20-2 mit 1 bis 2 % Cr ungewöhnlich hoher Carbidgehalt von 10 bis 13 % festgestellt [6]. Die Risse verliefen vorzugsweise in den carbidhaltigen Zonen. Ähnliche Gussstücke aus dieser Sorte enthalten sonst nur etwa 5 % Carbide und die Risse zeigen keinen Zusammenhang mit ihnen.

In einer vom Nickel Development Institute veranlassten Untersuchung [6] wurde der Einfluss des Gefüges anhand von Probe-

abgüssen bei hohen Spannungen mit Haltezeiten von 260 Tagen in künstlichem Meerwasser von 45 °C näher untersucht. Die Silicium- und Chromgehalte wurden innerhalb des Bereiches der Normzusammensetzung von GJSA-XNiCr20-2 variiert. Eisensorten, deren Siliciumgehalte im oberen und deren Chromgehalte im unteren Bereich lagen, hatten die geringste Anfälligkeit gegen Spannungsrissskorrosion. Sie trat aber auch bei ihnen in Form von feinen flachen Rissen auf. Schlecht geimpfte Proben gleicher Zusammensetzung zeigten stärkere und tiefere Risse. Die Risse folgten jedoch nicht den Carbiden. Eisensorten, die durch einen niedrigen Silicium- und einen hohen Chromgehalt mehr Carbide enthielten, zeigten noch stärkere und tiefere Risse, vor allem, wenn sie schlecht geimpft waren. Während bei den carbidarmen Eisen die Risse transkristallin waren, folgten sie bei den carbidreicheren den Carbidausscheidungen.

Die Folgerung ist, dass Gussstücke, die in warmem Meer- oder Brackwasser oder in Salzsolen eingesetzt werden sollen, spannungsarm gegläht werden sollten. Dies gilt besonders nach dem Fertigungsschweißen. Dabei sollte nicht versucht werden, durch einen höheren Chromgehalt die Festigkeit und allgemeine Korrosionsbeständigkeit zu steigern. Schmelzebehandlung und Impfung müssen sorgfältig durchgeführt werden, um einen möglichst niedrigen Carbidgehalt im Gefüge zu gewährleisten.

Wichtig ist auch, dass der Nickelgehalt hoch genug ist, um eine Martensitbildung in den Seigerungszone zu verhindern, und dass der Gehalt an Blei und anderen Spurenelementen niedrig gehalten wird, um die Bildung von nicht kugeligen Graphitformen, die die Festigkeit vermindern, auszuschließen. Auch Chunky-Graphit darf nicht auftreten. Nach [6] soll ein Nickel-Äquivalent

$$Ni_{equ} = \% Ni + \% Cr + 2 \cdot \% Mn \quad (6)$$

von mindestens 23,5 % eingehalten werden, um beim Spannungsarmglühen bei 650 °C nicht infolge zu geringer Stabilität des Austenits eine Martensitbildung zu verursachen. Der Austenit im Gusszustand ist nämlich an Kohlenstoff übersättigt und dadurch stabilisiert. Beim Glühen wird diese Übersättigung abgebaut, und der dann weniger stabile Austenit kann sich zu Martensit umwandeln.

In [40] wurde auch der Einfluss der Gussrandschicht untersucht, die Lamellen- und andere nichtkugelige Graphitformen aber keine Carbide enthielt. Ihre flächenhafte Korrosionsgeschwindigkeit war sehr hoch,



**Tabelle 15: Ergebnisse von Biegewechselversuchen mit verschiedenen Gusseisensorten und einem Vergütungsstahl an Luft sowie beim Besprühen mit entmineralisiertem Wasser, Wasser mit Inhibitor-Zusätzen und Wasser mit 3 % NaCl nach Lastwechselzahlen LW von 10<sup>7</sup> und 10<sup>8</sup> [44, 45]**

Werkstoff	Statische Eigenschaften			Dauer- bzw. Zeitfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ] im Medium								
	Zugfestigkeit R <sub>m</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	0,2 %-Dehngrenze R <sub>p0,2</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	Bruchdehnung A [%]	Luft	Entmineralisiertes Wasser		Wasser + Inhibitor				Salzwasser	
							1 % Borax		0,25 % Kaliumchromat		3 % NaCl	
LW=10 <sup>7</sup>	LW=10 <sup>8</sup>	LW=10 <sup>7</sup>	LW=10 <sup>8</sup>	LW=10 <sup>7</sup>	LW=10 <sup>8</sup>	LW=10 <sup>7</sup>	LW=10 <sup>8</sup>	LW=10 <sup>7</sup>	LW=10 <sup>8</sup>			
GJL, perlitisch	-	-	-	124	-	100	-	-	-	-	-	39
GJS, perlitisch	-	-	-	270	-	224	-	-	-	-	-	46
GJS, ferritisch	-	-	-	208	-	178	-	-	-	-	-	46
GJS-400-15	420	279	23	240	-	-	-	-	-	-	88	-
GJLA-XNiCuCr15-6-2	236	-	7	100	95	85	125	85	100	93	62	31
GJSA-XNiCr20-2	400	244	10	147	115	108	-	-	-	-	82	46
GJSA-XNiCr20-2	-	-	-	162	135	131	130	124	160	154	-	-

aber es trat keine Spannungsrissskorrosion auf. Wenn jedoch die Gusshaut nach etwa 200 bis 260 Tagen abgetragen war, begann auch hier die Rissbildung.

Die Gussstücke dürfen keine oberflächennahen Fehler wie Mikrolunker, Gasblasen, Graphitentartungen oder -anhäufungen, Carbidketten oder Schlackeneinschlüsse enthalten, die an ihnen Anrisse entstehen können. Diese können dann durch Spannungsrissskorrosion oder Schwingungsrissskorrosion weiterwachsen und das Gussstück zerstören [41].

Moderne Berechnungsverfahren ermöglichen eine bessere Werkstoffausnutzung durch Verringern der Wandstärken, was gerade bei großen Pumpenteilen zu einer spürbaren Material- und Gewichtseinsparung führt. Hierdurch kann sich allerdings die Rissgefahr verstärken, wenn die Wanddicken zu stark reduziert werden. In der Vergangenheit haben sich zum Beispiel Mindestwanddicken von 20 bis 25 mm bei 1 t schweren Gehäusen bewährt. Es wird vermutet, dass es bei Verminderung der Wanddicke bis an die rechnerisch mögliche Grenze im Betrieb zu Schwingungen kommen kann, die zu Dauerbrüchen oder Korrosionsermüdung führen. Bei Schadensfällen lässt es sich nur schwierig feststellen, welche Ursachen die Risse haben.

### 8.4 Schwingungskorrosion

Schwingungskorrosion oder Korrosionsermüdung führen bei allen Eisenwerkstoffen im Vergleich zu den Werten an Luft zu deutlich geringeren Werten der Dauerfestigkeit. Allerdings gibt es hierzu nur wenige Untersuchungen bei Gusseisenwerkstoffen. **Tabelle 15** enthält die Ergebnisse von Versuchsreihen an unlegierten und an austenitischen Gusseisensorten, bei denen die Proben in Biegewechselversuchen an Luft sowie beim Besprühen mit verschiedenen Lösungen geprüft wurden. Nach 10<sup>7</sup> Lastwechseln unter Korrosionseinfluss

wird im Gegensatz zur Prüfung an Luft bei keinem der untersuchten Werkstoffe die Dauerfestigkeit erreicht. Erst bei 10<sup>8</sup> Lastwechseln mündet die Wöhlerkurve asymptotisch in eine zur Abszisse parallelen Gerade, wobei die Werte in Salzwasser erheblich unter denen in Luft liegen. Die gegenüber unlegierten Gusseisen höhere Korrosionsbeständigkeit der austenitischen Sorten bringt hier keinen Vorteil mehr.

In **Tabelle 16** sind für eine Reihe von gewalzten Stählen und Nickelbasislegierungen die Werte der Korrosionsschwingfestigkeit in Seewasser im Vergleich zu GJSA-XNiCr20-2 zusammengestellt.

### 8.5 Verhalten in Alkalien

Die Beständigkeit von Gusseisen in alkalischen Medien wird durch Nickel verbessert. Diese Verbesserung setzt nach **Bild 19** bereits bei niedrigen Nickelgehalten ein.

Austenitisches Gusseisen ist weitgehend beständig (**Tabelle 17**), was auch durch praktische Erfahrungen bei der Herstellung von Ätzalkalien bestätigt wird [1 bis 3]. Auch in Ammoniak-Wasser und Ammoniumsalz-Lösungen haben sich austenitische Gusseisen vom Typ GJSA-XNiCuCr15-6-2 und GJSA-XNiCr20-2 bewährt.

### 8.6 Verhalten in Säuren

Die Beständigkeit der austenitischen Gusseisen gegen Säuren ist allgemein gering (**Tabelle 17**). Im **Bild 29** sind Iso-Korrosionskurven von GJSA-XNiCuCr15-6-2, unlegiertem Gusseisen und Silicium-Gusseisen in Schwefelsäure in Abhängigkeit von der Temperatur dargestellt. Bei Bewegung steigt die Korrosionsrate an.

In Schwefelsäure können austenitische Gusseisen bei niedrigen Konzentrationen von unter 1 % eingesetzt werden, da hier die Einflüsse von Bewegung und Temperatur gering sind. Auch beim Sulfonieren

**Tabelle 16: Korrosionsschwingfestigkeit in Seewasser von GJSA-XNiCr20-2 im Vergleich zu einigen anderen Guss- und Walzwerkstoffen [46]**

Werkstoff	Nominelle Zusammensetzung [Masse-%]	Zugfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	Schwingfestigkeit LW = 10 <sup>8</sup> [N/mm <sup>2</sup> ]
Inconel Alloy 625	Ni-21 Cr-9 Mo-3,6(Ta+Nb)-2,5 Fe	1030	345
Hastelloy C	Ni-16 Cr-16 Mo-5 Fe-4 W	745	221
Monel Alloy K-500	Ni-29 Cu-3 Al-1 Fe-0,7 Mn-0,6 Ti	1213	180
Incoloy Alloy 800	Fe-32 Ni-21 Cr-0,4 Ti-0,4 Al	614	165
Maraging Stahl, ungeschützt	} Fe-18 Ni-7 Co-5Mo-0,4 Ti	1724	34
Maraging Stahl, kathodisch geschützt bei - 0,85 V			103
Guss-Aluminiumbronze	Cu-11 Al-4 Ni-4Fe	793	103
X5CrNi18-9	Fe-19 Cr-10 Ni-2 Mn-0,08 C	545	103
X5CrNiMo18-9	Fe-18 Cr-12 Ni-2 Mn-2,5 Mo-0,08 C	586	97
X2CrNi18-10	Fe-19 Cr-10 Ni-2 Mn-0,03 C	517	97
X2CrNiMo18-10	Fe-18 Cr-12 Ni-2 Mn-2,5 Mo-0,03 C	545	90
Guss-Aluminiumbronze	Cu-10 Al-5 Ni-5 Fe-1,5 Mn	600	86
Guss-Mn-Al-Bronze	Cu-12 Mn-8 Al-3 Fe-2 Ni	690	62
GX5CrNi17-4	Fe-17 Cr-4 Ni	910	61 <sup>1)</sup>
Guss-Messing	Cu-40 Zn-2 Mn	503	55
GJSA-XNiCr20-2	Fe-20 Ni-2 Cr	-	52
Unlegierter Kohlenstoffstahl	-	414	14

<sup>1)</sup> In künstlichem Meerwasser

tierischer und pflanzlicher Öle hat sich austenitisches Gusseisen recht gut bewährt, da das Fett offenbar durch einen Schutzfilm den Angriff der an sich in wässriger Lösung zu hohen Säurekonzentration vermindert. Durch einen höheren Siliciumgehalt wird die Beständigkeit nach **Tabelle 17** verbessert, so dass die in der EN 13835 nicht mehr enthaltene Sorte GGG-NiSiCr 20 5 2 auch bei etwas höheren Säurekonzentrationen erfolgreich eingesetzt werden konnte [49].

Auch die Beständigkeit gegen Salzsäure ist wie bei fast allen Eisenwerkstoffen gering, so dass die Anwendungsmöglichkeiten auf niedrige Säurekonzentrationen bei Raumtemperatur beschränkt sind. Ähnliches gilt auch für Phosphorsäure.

### 8.7 Verhalten in weiteren Medien

Erfahrungen und Auflistungen zum Verhalten von austenitischem Gusseisen, vorwiegend mit Lamellengraphit, enthalten die Veröffentlichungen [1 bis 3, 5]. Für die Verwendung in Phosphorsäure kommen die austenitischen Gusseisensorten mit Einschränkung in Frage. Sie werden hauptsächlich in verdünnter, unbelüfteter Säure bei Raumtemperatur eingesetzt.

In vielen Salzlösungen - organischen und anorganischen - verhält sich austenitisches Gusseisen in der Regel beständiger als unlegiertes Gusseisen und unlegierter Stahl. Das Betriebsverhalten von austenitischem Gusseisen in Anlagen der Soleerhitzung, -verdampfung und Flotationstrennung ist im Vergleich zu anderen Werkstoffen gut.

Wenn Lösungen anorganischer saurer Sulfate hydrolysieren und besonders bei der Verdampfungstemperatur verdünnte

**Tabelle 17: Korrosionsgeschwindigkeit bei Laborversuchen einiger austenitischer Gusseisen in verschiedenen sauren und alkalischen Medien [48]**

Werkstoff	Medium					
	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 1%ig 60 °C	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 65%ig 35 °C	HCl 1%ig 60 °C	CH <sub>3</sub> COOH 2%ig	NaCl 20%ig siedend	NaOH 50%ig 60 °C
<b>Abtragung [mm/a]</b>						
GGL-NiCr 20 2	1,42	0,330	2,60	0,076	0,008	0,010
GGL-NiSiCr 20 5 3	0,91	0,127	1,14	0,066	0,003	0,015
GJSA-XNiCr20-2 <sup>1)</sup>	0,43	0,330	0,84	0,076	0,007	0,026
GJSA-XNiCr20-2 <sup>2)</sup>	0,51	0,250	1,00	0,051	0,004	0,076
GGG-NiSiCr 20 5 2	0,25	0,100	0,33	0,063	0,003	0,012

<sup>1)</sup> 2 % Cr  
<sup>2)</sup> 3 % Cr

Schwefelsäure bilden, ist Vorsicht geboten. Austenitisches Gusseisen kann bei der Verarbeitung saurer Sulfatlösungen nur verwendet werden, wenn der Säuregrad nicht zu hoch ist. Nicht beständig ist es gegenüber den Lösungen oxidierender saurer Salze wie Eisen (III)-, Kupfer (II)-, Zinn (IV)- und Quecksilber (II)-Salzen.

Citrat- und Thiocyanatlösungen greifen Gusseisen und unlegierten Stahl sehr stark an, weil ihre Salze mit Eisen lösliche Komplexverbindungen bilden. Austenitisches Gusseisen eignet sich in gewissen Temperatur- und Konzentrationsbereichen für Apparate, in denen diese Lösungen verdünnt behandelt werden.

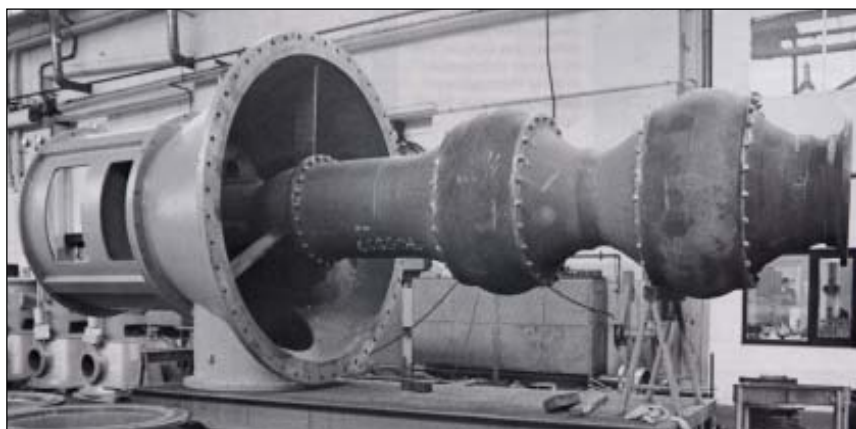
Die austenitischen Gusseisen haben in einer Vielzahl von weiteren Medien eine brauchbare Beständigkeit, so dass sie in der chemischen Verfahrenstechnik, der Petrochemie, bei der Erdöl- und Gasgewinnung sowie in der Lebensmittelindustrie zahlreiche Anwendungen gefunden haben.

Austenitische Gusseisenwerkstoffe bewähren sich mit gewissen Einschränkungen für Anlagen und Apparate, die organische Säuren, wie Essig-, Ameisen-, Oxalsäure, Fettsäuren (zum Beispiel Stearin-, Öl-, Linol- und Abietinsäure) sowie Teer-

säuren, wie sie bei der Destillation von Kohle- und Holzprodukten anfallen, enthalten. Sie sind gegenüber diesen Medien viel beständiger als unlegiertes Gusseisen und unlegierter Stahl. So korrodiert zum Beispiel GJSA-XNiCuCr15-6-2 in kalter 25%iger Essigsäure bei schwacher Durchlüftung mit maximal 0,5 mm/a, während unlegiertes Gusseisen 40- bis 50mal schneller korrodieren kann.

Üblicherweise wird austenitisches Gusseisen nur bei Anwesenheit von stark verdünnten organischen Säuren verwendet. Seine Beständigkeit gegenüber Fettsäuren ist bei mäßig erhöhter und bei Raumtemperatur ausreichend, in der Regel jedoch nicht für die Behandlung roher Fettsäuren bei hohen Temperaturen, wie sie beim Betrieb kontinuierlich arbeitender Destillieranlagen auftreten. Für Pumpen, Ventile und andere Einrichtungen, die mit diesen Säuren bei niedrigen und mittleren Temperaturen in Berührung kommen, wird jedoch austenitisches Gusseisen verwendet und hat sich auch in Seifenfabriken bewährt.

Manche organischen Verbindungen wie beispielsweise Aldehyde sind normalerweise nicht sehr aggressiv, können aber bei höheren Temperaturen zerfallen oder



**Bild 30: Meerwassersole-Rücklaufpumpe für eine Meerwasserentsalzungsanlage mit Verteilergehäuse, Leitrad und Steigrohr aus GJSA-XNiCrNb20-2, Förderleistung 3900 m<sup>3</sup>/h, Förderhöhe 70 m (Bild: KSB)**



**Bild 31: Zweiteiliges Pumpengehäuse für eine Meerwasserentsalzungsanlage aus GJSA-XNiCrNb20-2 Gesamtgewicht 6,7 t (Bild: KSB)**

hydrolysieren, so dass sich geringe Mengen der entsprechenden organischen Säuren bilden, die unlegiertes Gusseisen und unlegierten Stahl stark angreifen. Hierfür hat sich austenitisches Gusseisen als günstig erwiesen.

In Teerdestillationsanlagen wird austenitisches Gusseisen mit erhöhtem Siliciumgehalt mit Erfolg für solche Werkstücke eingesetzt, die gegen Ammoniumchlorid und verschiedene Phenolverbindungen beständig sein müssen.

In Erdölraffinerien und in der Petrochemie wird austenitisches Gusseisen mit Kugelgraphit erfolgreich seit vielen Jahren zur Förderung heißer Kohlenwasserstoffe verwendet. Bei der Destillation von Rohöl kann sich infolge Hydrolyse von Magnesium- und Calciumchlorid Salzsäure bilden. Die Praxis hat gezeigt, dass austenitisches Gusseisen gegen den Angriff der Kopfströme von Rohölestillations- und anderer Mineralölverarbeitungsanlagen beständig ist. GJSA-XNiCr20-2 ist besonders für Gehäuse von Rückflusspumpen geeignet. Die Ergebnisse von Betriebsversuchen in Rohölestillationsanlagen haben erwiesen, dass austenitisches Gusseisen ein zuverlässiger und wirtschaftlicher Werkstoff ist. Auch bei Anwesenheit von verdünnter Schwefelsäure hat sich hier austenitisches Gusseisen für Laufräder und Gehäuse von Pumpen gut bewährt.

### 8.8 Kostenvergleich mit anderen Werkstoffen

In der Anwendung stehen austenitische Gusseisen im Wettbewerb mit unlegierten oder niedrig legierten Gusseisen und Stahlgussorten, Edelstählen und Kupferbasislegierungen. Teile aus unlegiertem Stahl oder unlegiertem Gusseisen sind auf jeden Fall preiswerter. Austenitisches Gusseisen bietet dann Vorteile, wenn diese Werkstoffe nicht hinreichend beständig sind. Andererseits sind Gussstücke aus austenitischen Gusseisen meist preiswerter als entsprechende Teile aus gegossenen oder umgeformten und gefügten Edelstählen oder Kupferbasislegierungen. Hier ist eine Lebenszyklus-Kosten-Betrachtung angebracht, bei der die Kosten des einbaufertigen Bauteils und seiner Montage, dass heißt die Investitionskosten ebenso wie die Folgekosten während der Lebensdauer der Anlage in Form von Kosten für Wartungs- und Reparaturarbeiten, Ersatzbeschaffung mit Aus- und Einbau sowie Anlagestillstand zu berücksichtigen sind. Unter diesen Gesichtspunkten haben sich in vielen Fällen austenitische Gusseisen gut bewährt und als die wirtschaftlich günstigste Lösung erwiesen.

## 9 Eigenschaften

Von Werkstoffen zum Einsatz bei erhöhten Temperaturen werden folgende Eigenschaften gefordert:

- Oxidationsbeständigkeit,
- Maßbeständigkeit,
- Stabilität des Gefüges und damit der Eigenschaften,
- Warmfestigkeit,
- Beständigkeit gegen Temperaturwechsel und thermo-mechanische Ermüdung.

Von den austenitischen Gusseisen werden diese Forderungen im Rahmen der Möglichkeiten eines graphitischen Gusswerkstoffs erfüllt. Sie werden daher in erheblichem Umfang für temperaturbeanspruchte Bauteile verwendet. Aufgrund der höheren Warmfestigkeit und Oxidationsbeständigkeit werden heute für solche Anwendungen fast ausschließlich die Sorten mit Kugelgraphit eingesetzt.

### 9.1. Oxidationsbeständigkeit

Die Oxidations- oder Zunderbeständigkeit der austenitischen Gusseisen beruht auf der Bildung einer festhaftenden Schicht aus Oxidationsprodukten, die den darunter

liegenden Werkstoff schützt. Durch die Schutzschichtbildung nimmt die Zundergeschwindigkeit mit steigender Haltezeit ab, wird aber nicht Null. Typische Zunderkurven für eine Versuchsdauer von bis 32 Wochen (5300 h) sind im **Bild 32** zu sehen.

Bei Gusseisen mit Kugelgraphit bleibt der Oxidationsangriff auf die Oberfläche beschränkt, während er bei Gusseisen mit Lamellengraphit entlang der Graphitlamellen ins Innere des Werkstoffs vordringen kann. Durch diese innere Oxidation kommt es nicht nur zu einem schnelleren Zerstören des Werkstoffs, sondern auch zu einem Wachsen, da die sich am Graphit bildenden Oxide das Gefüge aufblähen. In bestimmten Temperaturbereichen erlauben nämlich die thermodynamischen Gleichgewichte eine Koexistenz von Graphit und Oxiden. Das unterschiedliche Verhalten der beiden Werkstoffgruppen beim Eindringen von Sauerstoff geht aus **Tabelle 18** deutlich hervor. Bei 700 °C verhält sich austenitisches Gusseisen mit Lamellengraphit nicht besser als unlegiertes und sogar schlechter als unlegiertes Gusseisen mit Kugelgraphit. Aus diesen Gründen werden heute so gut wie ausschließlich die Sorten mit Kugelgraphit verwendet, selbst wenn ihre höhere Warmfestigkeit nicht erforderlich ist.

**Tabelle 18: Mittlere Eindringtiefe der Oxidation bei der Glühung verschiedener Eisenwerkstoffe an Luft. Es sind die Werte nach 2000 h angegeben, die zum Teil aus Ergebnissen bei 1000 bis 5300 h errechnet wurden [53, 54, 55]**

Werkstoff	Eindringtiefe in [mm] bei folgender Glühbehandlung			
	650°C/500 h	705°C/3000 h	705°C/4000 h	815 °C/500 h
<b>Gusseisen mit Lamellengraphit GJL</b>				
1,70 % Si	-	0,95	-	-
1,98 % Si	-	-	-	0,895
2,50 % Si	-	1,30	-	-
Temperguss	-	0,83	-	-
<b>Gusseisen mit Kugelgraphit GJS</b>				
2,2 % Si, normalisiert	0,18	-	0,48	-
2,4 % Si, 2% Mo, normalisiert	0,15	-	-	-
2,5% Si Gusszustand	-	-	0,48	-
ferritisiert	-	-	0,38	-
2,8 % Si, normalisiert	-	-	-	0,465
3,3 % Si, normalisiert	-	-	-	0,130
4 % Si, 0 - 4 % Mo, ferritisiert	0,05 - 0,11	-	-	0,09 - 0,11
5,5 % Si	-	-	0,05	-
<b>Austenitisches Gusseisen GJSA</b>				
GJSA-XNiCr20-2	-	-	0,58	-
GJSA-XNiCr20-2	-	-	0,53	-
GJSA-XNi22	-	-	-	0,604
GJSA-XNiCr35-3	-	-	-	0,232
GJSA-XNiSiCr35-5-5	-	-	0,05	0,038
<b>Stähle</b>				
Unlegierter Stahlguss	-	1,70	-	-
Walzstahl, unlegiert	-	1,65	-	-
Stahl mit 12 % Cr (AISI 405)	-	0	-	-

**Tabelle 19: Zunderverhalten einiger austenitischer Gusseisen im Vergleich zu unlegierten Sorten und hitzebeständigem Stahl AISI 309 (ähnlich X35CrNiSi25-12) bei Temperaturen von 700 bis 925 °C [1, 56]**

Werkstoff	Wachstumsgeschwindigkeit der Zunderschicht in [mm/a]	
	Versuch 1 <sup>1)</sup>	Versuch 2 <sup>2)</sup>
Gusseisen mit Kugelgraphit		
2,5% Si	1,07	12,70
5,5% Si	0,10	0,13
GJSA-XNiCr20-2	2,50	7,60
GJSA-XNi20-2	1,07	4,45
GJSA-XNi22	1,78	-
GJSA-XNiSiCr30-5-5	0,10	0,00
AISI 309 (G-X 35 CrNiSi 25 12)	0,00	0,00

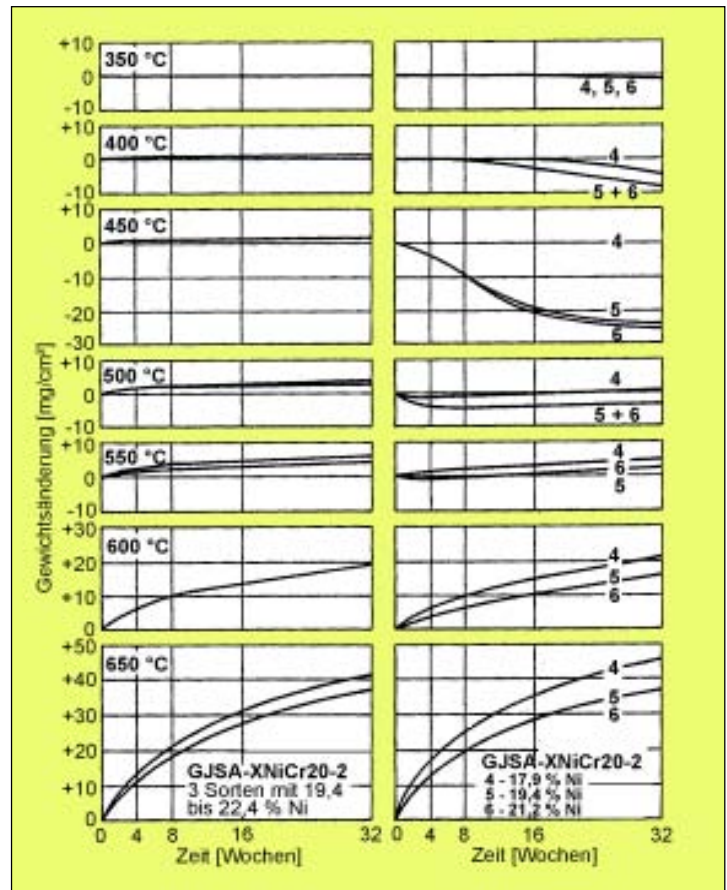
<sup>1)</sup> Ofenatmosphäre Luft, 400 h bei 700 °C

<sup>2)</sup> Ofenatmosphäre Luft, 600 h bei 870 bis 925 °C, 600 h zwischen 870 und 925 °C sowie zwischen 430 und 480 °C, 600 h bei 430 bis 480 °C

Aus dem Mechanismus der inneren Oxidation und der Schutzschichtbildung ergibt sich, dass Gussfehler an der Oberfläche oder in der Randschicht vermieden werden müssen. Poren, Einschlüsse und lokale Anhäufungen oder Zeilen von Graphit führen zu örtlich verstärkter Oxidation, die sich je nach Beanspruchung in Form von Kratern oder Pusteln äußert. Entartete Graphitformen oder Lamellengraphit als Folge schlechter Magnesiumbehandlung ermöglichen eine innere Oxidation. Auch in einer Randschicht, die infolge des Formstoffeinflusses statt Kugelgraphit Lamellengraphit enthält, kommt es zu einem Eindringen der Oxidation.

Die Schutzschicht ist umso dichter und wirksamer, je höher der Legierungsgehalt ist. Besonders wirksam ist Silicium, wie bereits eingangs ausgeführt wurde (**Bild 9**). Silicium wirkt in gleicher Weise bei austenitischen und unlegierten ferritischen Gusseisen, wie aus der **Tabelle 18** sowie aus den in den **Tabellen 19** und **20** aufgeführten Ergebnissen von vergleichenden Zunderversuchen ersichtlich ist. Mit 4 bis 5 % Silicium legierte ferritische Sorten sind hier den siliciumarmen austenitischen Eisen bei der Oxidationsbeständigkeit überlegen. Sie versagen allerdings, wenn die Betriebstemperatur die bei 820 bis 920 °C liegende Umwandlungstemperatur von Ferrit in Austenit wesentlich übersteigt, da die Phasenumwandlung die schützende Schicht aus SiO<sub>2</sub> aufreißt.

Aufgrund der günstigen Wirkung des Siliciums wurde eine Reihe von austenitischen Gusseisensorten mit erhöhtem Siliciumgehalt entwickelt, die eine höhere Oxidationsbeständigkeit besitzen. Wie bereits erwähnt, sind die aus Kostengründen attraktiven Legierungen mit weniger als etwa 30 % Ni bei Langzeitbeanspruchung



**Bild 32. Zunderkurven austenitischer Gusseisen mit Kugelgraphit GJSA-XNiCr20-2 (links) und Lamellengraphit GJLA-XNiCr20-2 (rechts) für eine Versuchsdauer von bis zu 32 Wochen (5300 h) ohne Berücksichtigung losen Zunders [50 - 52]**

**Tabelle 20: Zunderverhalten einiger austenitischer Gusseisen bei Temperaturen von 705 bis 1065 °C im Vergleich zu hitzebeständigem Stahlguss GX40CrNiSi25-20 (1.4848) bei Pendelglühungen an Luft mit 5 % Wasser und einer gesamten Versuchsdauer von 504 h [56]**

Werkstoff	Si-Gehalt [Masse-%]	Wachstum der Zunderschicht an Luft und im Ofen [mm/a]		Zunderverlust [mg/cm²] nach Glühen bei	
		Versuch 1 (700 °C/400 h)	Versuch 2 (900 °C/600 h +450 °C/600 h)	900 °C	1065 °C
Austenitische Gusseisen mit Kugelgraphit					
GJSA-XNi22	~2,0	1,78	4,45	n. b.	n. b.
GJSA-XNiCr20-2	~2,5	1,07	n. b.	970	n. b.
GJSA-XNiCr30-3	~2,5	n. b.	n. b.	250	n. b.
GJSA-XNiSiCr35-5-2	~5,5	0,10	0,0	6	60
Austenitischer Stahlguss					
GX40CrNiSi25-20 (ähnlich wie HK 40)	~2,0	0,0	0,0	n. b.	61

im Temperaturbereich unter 800 °C durch Gefügeumwandlungen versprödungsanfällig. Sie sind daher in die EN 13835 nicht mehr aufgenommen worden.

Für den Einsatz bei sehr hohen Temperaturen speziell für Abgasanlagen in Fahrzeugmotoren wurde unter Ausnutzung der

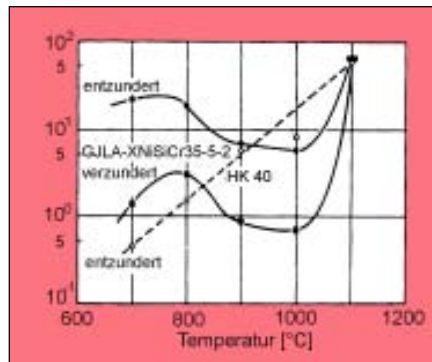
ebenfalls günstigen Wirkungen von Nickel und Chrom die hoch hitzebeständige Sorte GJS-NiSiCr35-5-2 (Ni-Resist D-5S) entwickelt, die bis zu Temperaturen von über 1000 °C erfolgreich verwendet wird [28, 29, 57 bis 59]. Nach **Tabelle 20** ist ihre Zunderbeständigkeit bei diesen hohen Temperaturen ebenso gut oder besser

wie beim hitzebeständigen Stahlguss GX40CrNiSi25-20. Die Ursache ist, dass das Gusseisen 5 % Si enthält, während bei Stahlguss der Siliciumgehalt wegen der Sigma-Phasenversprödung auf 2,5 % begrenzt werden muss.

Die schützende Wirkung des hohen Siliciumgehalts ist klar in **Tabelle 20** erkennbar. GJSA-XNiSiCr35-5-2 ist in Bezug auf die Oxidationsbeständigkeit bei den hohen Temperaturen dem hitzebeständigen Edelstahl mindestens gleichwertig. 5 % Si scheinen den Werkstoff oberhalb von 900 °C mindestens ebenso gut zu schützen wie ein hoher Chromgehalt von 25 %. Die niedriger legierte Sorte GJSA-XNiCr20-2 (GGG-NiCr 20 2, Ni-Resist D-2) ist wegen ihres tieferen Siliciumgehalts deutlich weniger zunderbeständig.

In Abgassystemen von Motoren ist die Haftfestigkeit des Zunders wichtig, da mitgerissene Oxidteilchen den Katalysator oder die Turbine des Turboladers schädigen können. Besonders gefährlich können dabei Temperaturwechsel sein, da sie die Zunderschicht zerrütten können. Zyklische Oxidationsversuche ergaben, dass die Haftfestigkeit des Zunders bei GJSA-XNiSiCr-35-5-2 sehr gut ist. Ein typisches Ergebnis ist im **Bild 33** dargestellt. Die Proben wurden in zyklischen Prüfungen insgesamt einundzwanzigmal bei einer Gesamtverweildauer von 504 h in einer Atmosphäre aus Luft mit 5 % Wasserdampf erhitzt und wieder abgekühlt.

Der Gewichtsverlust der verzunderten Probe ist insgesamt sehr gering und der Zunder wird erst bei der mechanischen Entzunderung entfernt. Im Temperaturbe-



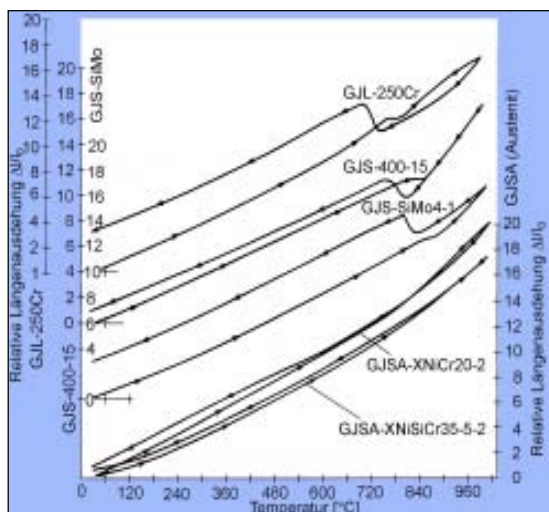
**Bild 33. Gewichtsverlust durch Verzunderung von GJSA-XNiSiCr35-5-2 (Ni-Resist D-2S, GGG-NiSiCr 35 5 2) und Stahlguss HK40 (ähnlich 1.4848) in 21 Prüfzyklen auf die angegebenen Temperaturen bei einer Gesamtverweildauer von 504 h in einer Atmosphäre aus Luft mit 5 % Wasserdampf [58]**

reich von 800 bis 1 000 °C scheint sich ein besonders dichter und hafter Zunder zu bilden. Das Verhalten ist ähnlich wie bei hitzebeständigem Edelstahlguss HK 40 (ähnlich GX40CrNiSi 25-20, W.-Nr. 1.4848).

Zusätze von weiteren Elementen wie Aluminium, Seltene Erden, Titan usw. um die Zunderbeständigkeit von GJSA-XNiSiCr35-5-2 weiter zu verbessern, waren nach Versuchen [63] ziemlich wirkungslos oder sogar schädlich. Ähnliches gilt auch für die Maßhaltigkeit und die Volumenbeständigkeit bei Temperaturwechseln.

## 9.2 Maßbeständigkeit und Gefügestabilität

Da die austenitischen Gusseisen mit Kugelgraphit keiner Phasenumwandlung und keiner inneren Oxidation unterliegen, besitzen sie eine hohe Maß- und Volumenbeständigkeit. Im **Bild 34** sind typische Di-



**Bild 34. Typische Dilatometerkurven verschiedener Gusseisen [33, 34]**



**Bild 35: Stereolithographiemodell (links) und Gussteil (rechts) für den Konus eines Dieselmotorfilters aus GJSA-XNiSiCr35-5-2, Gewicht rund 2 kg (Bild: Buchholz, Zweibrücken)**

latometerkurven verschiedener Gusseisen dargestellt. Die Ferrit-Austenit-Umwandlung verursacht bei den ferritischen Werkstoffen eine Volumenänderung, die nicht vollständig reversibel ist und zu inneren Spannungen und Verzug des Bauteils führt. Hinzu kommt die Möglichkeit, dass sich bei der Abkühlung statt Ferrit Perlit oder sogar Martensit bilden. Aber die Stabilität des Gefüges und damit der Eigenschaften ist weitgehend gewährleistet.

Bei den Sorten mit erhöhtem Siliciumgehalt kommt es, wie bei GJSA-XNiSiCr35-5-2 festgestellt wurde, im Temperaturbereich zwischen etwa 450 und 650 °C durch ein Ausscheiden von Siliciden aus dem Austenit zu einer Alterung, die die Dehnung etwas vermindert. Dieser Effekt ist völlig reversibel und oberhalb von etwa 800 °C, das heißt bei den üblichen Betriebstemperaturen, es werden die Ausscheidungen wieder aufgelöst.

## 9.3 Warmfestigkeit

Die austenitische Grundmasse verleiht den austenitischen Gusseisen eine höhere Warmfestigkeit als den ferritischen Gusseisensorten. Anhaltswerte der Eigenschaften einiger austenitischer Sorten bei erhöhten Temperaturen enthält **Tabelle 21**. Ergänzend sind in **Tabelle 22** Warmfestigkeitswerte für GJSA-XNiCuCr15-6-2 angegeben. Im **Bild 36** ist die Abhängigkeit der mechanischen Eigenschaften von der Temperatur für einige austenitische Gusseisen im Vergleich zu un- und niedrig legierten Gusseisen mit Kugelgraphit und hitzebeständigem Stahlguss dargestellt.

Die Überlegenheit der austenitischen über die ferritischen Gusseisen bei der Warmfestigkeit macht sich, wie aus **Bild 37**

Tabelle 21: Anhaltswerte für die Eigenschaften von austenitischem Gusseisen bei erhöhten Temperaturen nach EN 13835

Eigenschaft	Temperatur [°C]	Normalsorte		Sondersorte		
		EN-GJSA- XNiCr20-2 (EN-JS3011) EN-GJSA- XNiCrNb20-2 (EN-JS3031)	EN-GJSA- XNi22 (EN-JS3041)	EN-GJSA- XNiCr30-3(EN- JS3081)	EN-GJSA- XNiSiCr30-5- 5(EN-JS3091)	EN-GJSA- XNiCr35-3(EN- JS3101)
Zugfestigkeit $R_m$ [N/mm <sup>2</sup> ]	20	417	437	410	450	427
	430	380	368	-	-	-
	540	335	295	337	426	332
	650	250	197	293	337	286
	760	155	121	186	153	175
0,2%-Dehngrenze $R_{p0,2}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	20	246	240	276	312	288
	430	197	184	-	-	-
	540	197	165	199	291	181
	650	176	170	193	239	170
	760	119	117	107	130	131
Bruchdehnung (Kurzzeitversuch) [%]	20	10,5	35	7,5	3,5	7
	430	12,0	23	-	-	-
	540	10,5	19	7,5	4	9
	650	10,5	10	7	11	6,5
	760	15,0	13	18	30	24,5
Zeitstandfestigkeit (1000h) [N/mm <sup>2</sup> ]	540	197	148	-	-	-
	595	127 <sup>1)</sup>	95 <sup>1)</sup>	165	120	176
	650	84	63	105 <sup>1)</sup>	67 <sup>1)</sup>	105 <sup>1)</sup>
	705	60 <sup>1)</sup>	42 <sup>1)</sup>	68	44	70
	760	39 <sup>1)</sup>	28 <sup>1)</sup>	42 <sup>1)</sup>	21 <sup>1)</sup>	39 <sup>1)</sup>
Spannung zum Erreichen einer Kriechgeschwindigkeit von mind. 1 % je 1000 h [N/mm <sup>2</sup> ]	540	162	91	-	-	190 <sup>1)</sup>
	595	92 <sup>1)</sup>	63 <sup>1)</sup>	-	-	112 <sup>1)</sup>
	650	56	40	-	-	67 <sup>1)</sup>
	705	34 <sup>1)</sup>	24 <sup>1)</sup>	-	-	56
Spannung zum Erreichen einer Kriechgeschwindigkeit von mind. 1 % je 1000 h [N/mm <sup>2</sup> ]	540	63	-	-	-	-
	595	39 <sup>1)</sup>	-	-	-	70
	650	24	-	-	-	-
	705	15 <sup>1)</sup>	-	-	-	39
Zeitstandbruchdehnung (1000 h)[%]	540	6	14	-	-	-
	595	-	-	7	10,5	6,5
	650	13	13	-	-	-
	705	-	-	12,5	25	13,5

<sup>1)</sup> Diese Werte sind interpolierte bzw. extrapolierte Werte

hervorgeht, erst bei höheren Temperaturen bemerkbar. Unterhalb von 500 °C hat das mit 4 % Si und 1 % Mo legierte ferritische Gusseisen noch deutlich höhere Werte der Zugfestigkeit und 0,2 %-Dehngrenze. Typische Werte der Zugfestigkeit, 0,2%-Dehngrenze, Bruchdehnung und Bruchdehnung einiger austenitischer Gusseisensorten mit Kugelgraphit werden in den **Bildern 38 bis 40** angegeben.

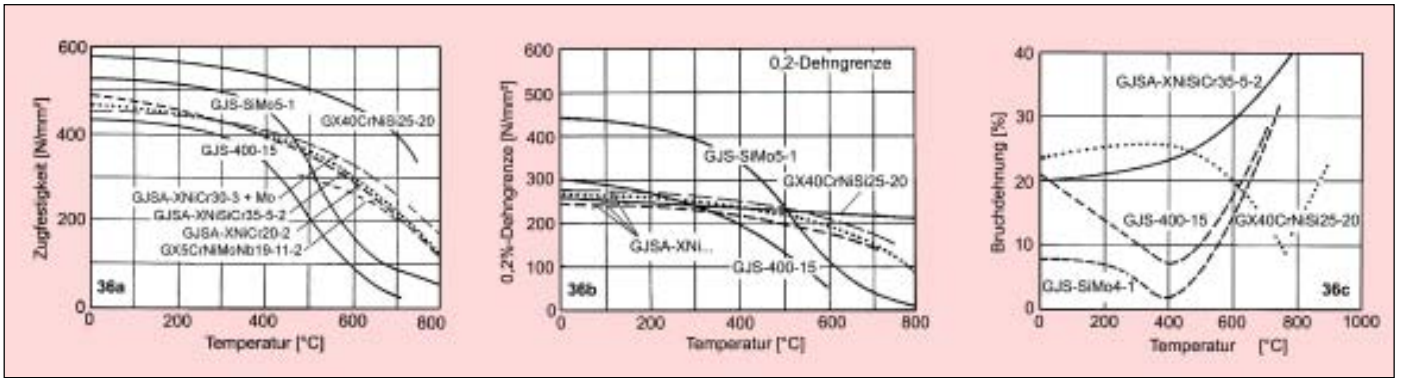
Für das Bemessen von Bauteilen sind Kriechfestigkeit und Zeitstandfestigkeit wichtig. Einige Zeitstandwerte enthält **Bild 42**. Die Festigkeit der höher legierten austenitischen Gusseisen ist gegenüber der Sorte GJSA-XNiCr20-2 höher, die der chromfreien Sorte GJSA-XNi22 liegt deut-

lich tiefer. Einen Vergleich verschiedener Werkstoffe anhand von extrapolierten Anhaltswerten über einen weiteren Bereich von Temperaturen und Standzeiten ermöglicht das Larson-Miller-Parameter-Schaubild im **Bild 43**. Ergänzend enthält **Bild 44** Zeitstandwerte und Kriechkurven dreier Schmelzen der Sorte GJSA-XNiSiCr35-5-2 bei 760 und 860 °C.

Durch einen Molybdänzusatz von bis zu 2 % kann die Warmfestigkeit weiter verbessert werden. Im Larson-Miller-Parameter-Schaubild **Bild 43** sind auch Werte zweier mit Molybdän legierter austenitischer Gusseisen enthalten. Die mechanischen Eigenschaften einiger austenitischer Gusseisen mit und ohne Molybdänzusatz sind in **Tabelle 24** zusammengestellt.

## 9.4 Beständigkeit gegen Temperaturwechsel und thermo-mechanische Ermüdung

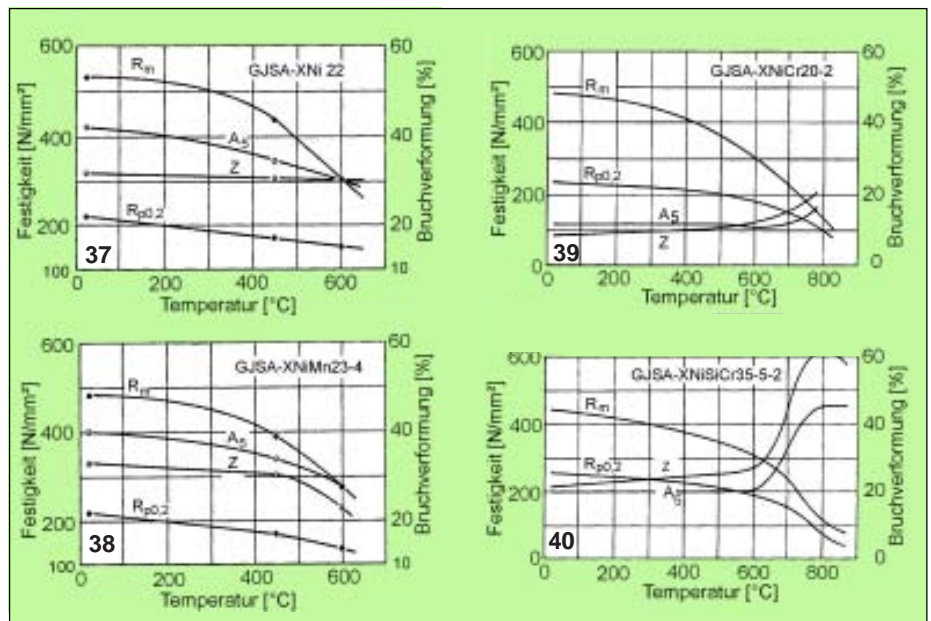
Das Verhalten bei einer Temperaturwechselbeanspruchung hängt in komplexer Weise von der Festigkeit, der Kriechfestigkeit, der Zähigkeit, der Wärmeleitfähigkeit, dem thermischen Ausdehnungskoeffizienten und dem E-Modul des Werkstoffs und den äußeren Bedingungen wie Höhe der Temperaturbeanspruchung, Geschwindigkeit und Bereich der Temperaturwechsel sowie Behinderung der Ausdehnung und Schwindung des Bauteils zusammen. Bei einer thermo-mechanischen Beanspruchung kommen noch



**Bild 36.** Typische Werte der Temperaturabhängigkeit von Zugfestigkeit, Streckgrenze und Dehnung von ferritischen und austenitischen Gusseisensorten und zweier Stahlgussorten [3, 4, 55, 57, 60 - 63]. Die genannten Werkstoffe werden in einem Bereich von Zusammensetzungen und teilweise auch Wärmebehandlungen erzeugt, so dass die tatsächlichen Kennwerte der Eigenschaften in einem breiten Streuband liegen. Während der Temperaturbeanspruchung können Gefügeänderungen und Ausscheidungen auftreten, die ebenfalls die Eigenschaften verändern.

äußere dynamische Spannungsbelastungen hinzu. Derartige Beanspruchungen spielen vor allem im Motorenbau eine Rolle.

Der hohe thermische Ausdehnungskoeffizient des Austenits und die relativ geringe Wärmeleitfähigkeit sind an sich ungünstig, werden aber durch die hohe Warmfestigkeit und vor allem die Zähigkeit des Werkstoffs überkompensiert, so dass die austenitischen Gusseisen allgemein eine gute Beständigkeit gegen die Bildung von Temperaturwechselrissen aufweisen. In manchen Fällen kann es aber zu einem Verzug kommen. Die anderen Gusseisenwerkstoffen überlegene Beständigkeit wird anhand von Versuchsergebnissen an Auspuffkrümmern im **Bild 47** deutlich gemacht. Eine besonders hohe Temperaturwechselbeständigkeit hat die Sorte GJSA-XNiSiCr35-5-2, die sie zu dem hochwertigsten Gusseisenwerkstoff für Abgaskrümmer und Turboladergehäuse gemacht hat. Sie zeichnet sich außer durch hohe Hitzebeständigkeit auch infolge des Nickelgehalts von 35 % durch einen besonders niedrigen thermischen Ausdehnungskoeffizienten (siehe dort) aus. Dadurch wer-



**Bild 37:** Zugfestigkeit, 0,2%-Dehngrenze, Bruchdehnung und Brucheinschnürung von GJSA-XNiCr22 [64]  
**Bild 38:** Zugfestigkeit, 0,2%-Dehngrenze, Bruchdehnung und Brucheinschnürung von GJSA-XNiMn23-4 [64]  
**Bild 39:** Zugfestigkeit, 0,2%-Dehngrenze, Bruchdehnung und Brucheinschnürung von GJSA-XNiCr20-2 [1, 64]  
**Bild 40:** Zugfestigkeit, 0,2%-Dehngrenze, Bruchdehnung und Brucheinschnürung von GJSA-XNiSiCr35-5-2 [57]

**Tabelle 22:** Warmfestigkeitswerte für GJSA-XNiCuCr15-6-2 [1]

Temperatur [°C]	Zugfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	
370	180 - 280	700 - 980
540	110 - 180	180 - 350
820	40 - 80	40 - 80



**Bild 41:** Dünnwandiger Abgaskrümmer für 8-Zylinder-Otto- und -Dieselmotor aus GJSA-XNi-SiCr35-5-2 (Bild: Montforts Mönchengladbach)

den die inneren Spannungen aufgrund von Temperaturdifferenzen, die bei Temperaturwechseln Risse oder Verzug erzeugen können, besonders niedrig gehalten. Die durch Temperaturwechsel erzeugte Spannung in einem Bauteil lässt sich angenähert berechnen nach der Formel [67]:

$$\sigma_{\text{therm}} = \alpha \cdot E \cdot \Delta T \quad (7)$$

- $\sigma_{\text{therm}}$  - Temperaturwechselspannung
- $\alpha$  - thermischer Ausdehnungskoeffizient
- E - E-Modul
- $\Delta T$  - Temperaturdifferenz im Bauteil

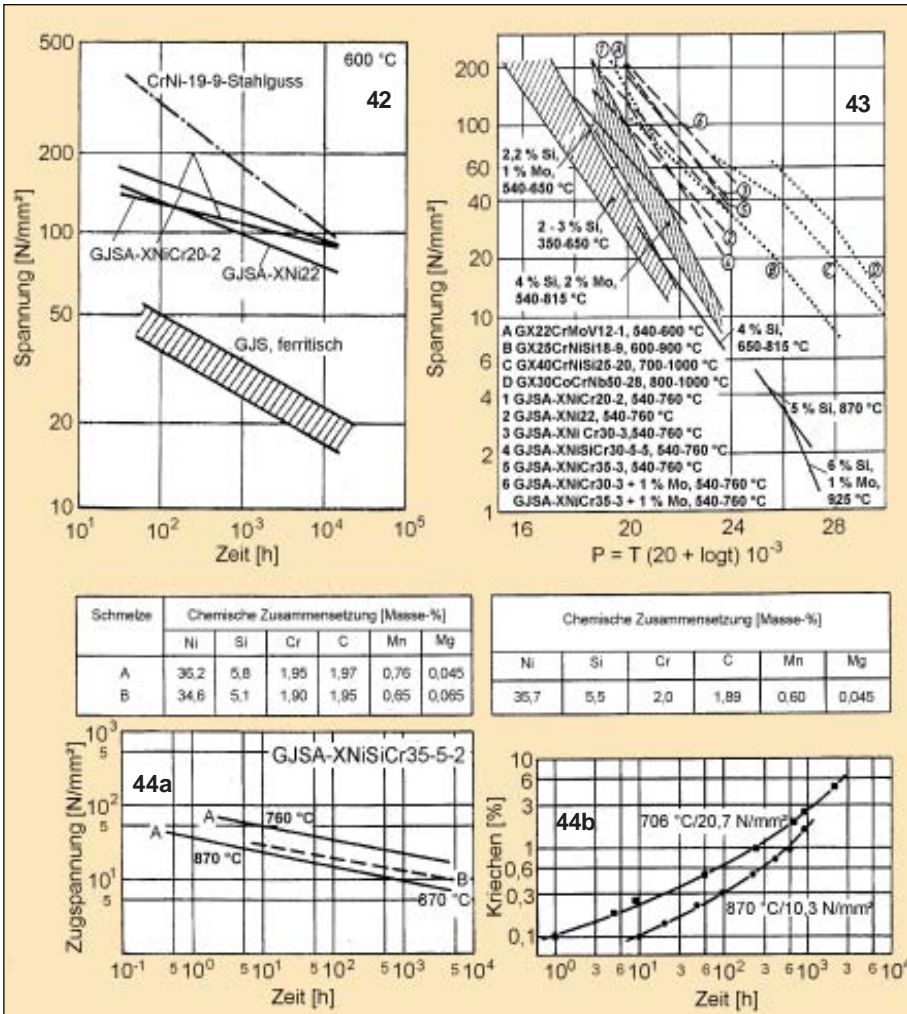


Bild 42. Zeitstandfestigkeit von ferritischem und zwei austenitischen Gusseisen sowie von 19 Cr-9 Ni-Stahlguss bei 600 °C [2, 64]

Bild 43. Larson-Miller-Parameter-Schaubild verschiedener Gusswerkstoffe. Werte der Gusseisen für 100 und 1 000 h, der Stahlgusswerkstoffe für 10 000 h

Bild 44. Zeitstandwerte und Kriechkurven dreier Schmelzen der Sorte GJSA-XNiSiCr35-5-2 (GGG-NiSiCr 35 5 2, D-5S) bei 760 und 860 °C [5, 57]

Tabelle 23: Zeitstandwerte verschiedener austenitischer Gusseisen mit Kugelgraphit [51]

Werkstoff	Temperatur [°C]	Zeit				
		3000 h			10000 h	30000 h
		$R_{p0,5}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$R_{p1,0}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$R_m$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$R_m$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$R_m^{(4)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]
GJSA-XNiCr20-2 <sup>1)</sup>	550	-	(108) <sup>3)</sup>	178	(147) <sup>3)</sup>	113/122
GJSA-XNiCr20-2+Mo		-	-	228	-	136/-
GJSA-XNiCr20-2 <sup>2)</sup>		-	-	162	(116) <sup>3)</sup>	113/-
GGG-NiSiCr20 5 2		-	-	131	(119) <sup>3)</sup>	-
GJSA-XNiCr20-2 <sup>1)</sup>	650	46	57	71	(54) <sup>3)</sup>	46/39
GJSA-XNiCr20-2+Mo		(65) <sup>3)</sup>	74	88	(70) <sup>3)</sup>	62/-
GJSA-XNiCr20-2 <sup>2)</sup>		(31) <sup>3)</sup>	46	71	49	46/40
GGG-NiSiCr20 5 2		(23) <sup>3)</sup>	35	54	(39) <sup>3)</sup>	34/29
GJSA-XNiCr30-3		49	59	72	(42) <sup>3)</sup>	46 <sup>3)</sup> /-
GJSA-XNiSiCr30-5-5		(29) <sup>3)</sup>	39	54	39	34/28
GGG-NiSiCr20 5 2	725	(15) <sup>3)</sup>	(20) <sup>3)</sup>	29	(23) <sup>3)</sup>	18/17
GJSA-XNiCr30-3		-	(29) <sup>3)</sup>	35	-	25/-
GJSA-XNiSiCr30-5-5		-	-	29	23	18/17

<sup>1)</sup> 2 % Cr

<sup>2)</sup> 3 % Cr

<sup>3)</sup> In Klammern gesetzte Werte durch geringe Extrapolation aus Spannungs-Zeit-Kurven erhalten

<sup>4)</sup> Erster Wert nach Larson-Miller-Methode, zweiter Wert durch Extrapolation aus Spannungs-Zeit-Kurven (bis 77 500 h) erhalten

<sup>5)</sup> Mögliche Nichtlinearität der Kurve vernachlässigt, Wert kann daher zu hoch sein

Nach diesem Verfahren wurden für einige Werkstoffe die bei einer Temperaturdifferenz im Bauteil von 100 K auftretenden Spannungen berechnet. Die Ergebnisse enthält **Tabelle 25**.

Der Vorteil der hochnickelhaltigen austenitischen Gusseisen mit niedrigem thermischen Ausdehnungskoeffizienten ist offensichtlich. Bei der weiteren Beurteilung müssen natürlich die unterschiedlichen Werte von Festigkeit, Zähigkeit und thermischer Leitfähigkeit berücksichtigt werden.

## 9.5 Anwendungen bei erhöhten Temperaturen

Die mengenmäßig wichtigste Anwendung von austenitischen Gusseisen bei erhöhten Temperaturen ist heute Fahrzeugguss in



Bild 45: Turbolader von Allied Signal-Garret für den V8-Bi-Turbodieselmotor von BMW mit einem Turbinengehäuse aus GJSA-XNiSiCr35-5-2 und einem Feingussteil Turbinenlaufrad aus einer hoch wärmfesten Nickellegierung (Bild: BMW München)



Bild 46: Turbolader für Porsche 911 Turbo mit einem Gehäuse aus GJSA-XNiSiCr35-5-2 (Bild: 3K-Warner, Kirchheimboladen)



Tabelle 24: Mechanische Eigenschaften bei erhöhten Temperaturen von fünf austenitischen Gusseisen mit und ohne Molybdänzusatz [65]

Eigenschaften	Prüf-Temperatur [°C]	GJSA-XNiCr20-2		GJSA-XNi22	GJSA-XNiCr30-3		GJSA-XNiSiCr30-5-5		GJSA-XNiCr35-3	
		ohne <sup>1)</sup>	mit <sup>1)</sup>	ohne <sup>1)</sup>	ohne <sup>1)</sup>	mit <sup>1)</sup>	ohne <sup>1)</sup>	mit <sup>1)</sup>	ohne <sup>1)</sup>	mit <sup>1)</sup>
Zeitstandfestigkeit (1000 h) [N/mm <sup>2</sup> ]	540	197	-	148	-	-	-	-	-	-
	595	127 <sup>2)</sup>	183	95 <sup>2)</sup>	165	214	120	134	176	225
	650	84	109 <sup>2)</sup>	63	105 <sup>2)</sup>	127 <sup>2)</sup>	67 <sup>2)</sup>	77 <sup>2)</sup>	105 <sup>2)</sup>	130 <sup>2)</sup>
	705	60 <sup>2)</sup>	77 <sup>2)</sup>	42 <sup>2)</sup>	68	77	44	53	70	84
	760	39 <sup>2)</sup>	42 <sup>2)</sup>	28 <sup>2)</sup>	42 <sup>2)</sup>	49 <sup>2)</sup>	21 <sup>2)</sup>	28 <sup>2)</sup>	39 <sup>2)</sup>	46 <sup>2)</sup>
Kriechgeschwindigkeitsgrenze (0,0001% h) [N/mm <sup>2</sup> ]	540	162	190 <sup>2)</sup>	91	-	204 <sup>2)</sup>	-	-	190 <sup>2)</sup>	197 <sup>2)</sup>
	595	92 <sup>2)</sup>	112 <sup>2)</sup>	63 <sup>2)</sup>	-	127	-	-	112 <sup>2)</sup>	120
	650	56	67 <sup>2)</sup>	40	-	84 <sup>2)</sup>	-	-	67 <sup>2)</sup>	74 <sup>2)</sup>
	705	34 <sup>2)</sup>	39	24 <sup>2)</sup>	-	49	-	-	56	42 <sup>2)</sup>
	Kriechgeschwindigkeitsgrenze (0,0001% h) [N/mm <sup>2</sup> ]	540	63	127 <sup>2)</sup>	-	-	148 <sup>2)</sup>	-	-	-
595		39 <sup>2)</sup>	77	-	-	91	-	-	70	77
650		24	42 <sup>2)</sup>	-	-	56 <sup>2)</sup>	-	-	-	47
705		15 <sup>2)</sup>	25	-	-	35	-	-	39	28
Zeitstandbruchdehnung (1000 h) [%]		540	6	-	14	-	-	-	-	-
	595	-	5,5	-	7	5	10,5	10	6,5	5,5
	650	13	-	13	-	-	-	-	-	-
	705	-	11,5	-	12,5	16	25	21	13,5	11,5

<sup>1)</sup> Molybdän-Zusatz (0,7 bis 1%)

<sup>2)</sup> Diese Werte sind inter- bzw. extrapoliert

Tabelle 25: Durch Temperaturwechsel in einem Bauteil erzeugte Spannungen, angenähert berechnet nach der Formel  $\sigma_{therm} = \alpha \cdot E \cdot \Delta T$  für 100 K Temperaturdifferenz [67]

Form von Auspuffsammelrohren und Turboladergehäusen. Diese Teile bestehen je nach Höhe der Temperaturbeanspruchung aus GJSA-XNiCr20-2 mit angepasstem Chromgehalt, GJSA-XNiSiCr35-3 oder vorzugsweise aus GJSA-XNiSiCr35-5-2.

Im Ofen- und Anlagenbau und in der Verfahrenstechnik wird austenitisches Gusseisen mit Kugelgraphit für zahlreiche Bauteile im Wettbewerb zu den hitzebeständigen Stahlgussorten verwendet. Aufgrund seiner geringeren Festigkeit wird es für mechanisch nicht oder gering beanspruchte Gussstücke vor allem aus Kostengründen eingesetzt.

Werkstoff	Zugfestigkeit bei 20°C [N/mm <sup>2</sup> ]	E-Modul bei 20°C [kN/mm <sup>2</sup> ]	Thermischer Ausdehnungskoeffizient bei 20 – 100 °C [10 <sup>-6</sup> /K]	
GJL-200	200	84	2,5	98
GJS-400-15	400	16	13,3	210
GJS-SiMo4-1	600	16	13,0	204
Perlitischer Stahl	422	210	11,7	238
Austenitischer Stahl	500	204	20,0	408
GJSA-XNiCr20-2	370	123	17,6	216
GJSA-XNi22	370	115	17,4	200
GJSA-XNiCr30-3	370	98	9,9	97
GJSA-XNi35	370	127	4,5	57
GJSA-XNiCr35-3	370	118	5,0	59
GJSA-XNiCr35-5-2	370	130	8,6	112

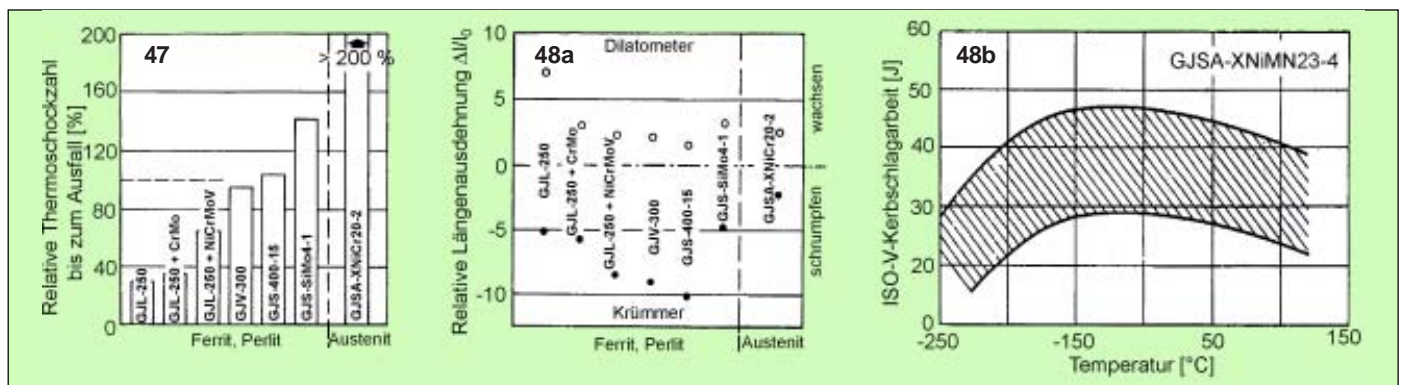


Bild 47. Im Motorenprüfstand ermittelte relative Temperaturwechselzahl bis zum Reißen des Auspuffkrümmers aus verschiedenen Gusseisenwerkstoffen bei Spitzentemperatur der Temperaturzyklen von 900 °C. Im Dilatometer kam es zu einem Wachsen, während der Abgaskrümmers infolge der behinderten Expansion und Kontraktion schrumpfte [66].

Bild 48. Streuband der Kerbschlagarbeit von GJSA-XNiMn23-4, ermittelt an Proben aus Betriebs- und Laborschmelzen [68]

## 10 Eigenschaften bei tiefen Temperaturen

Die austenitische Grundmasse behält auch bei tiefen Temperaturen eine hohe Zähigkeit. Es ist keine Übergangstemperatur der Kerbschlagarbeit zu beobachten (**Bild 5**). Austenitische Gusseisen sind also für den Einsatz bei tiefen Temperaturen geeignet, wobei heute wegen ihrer günstigeren Eigenschaften fast ausschließlich die Sorten mit Kugelgraphit Verwendung finden.

Wie aus **Bild 5** zu entnehmen ist, ist GJSA-XNi22 für Temperaturen bis  $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$  und GJSA-XNiMn23-4 sogar bis  $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$  geeignet. Auch chromfreies GJSA-XNiCr30-2 hat bei niedrigen Temperaturen hohe Werte für die Kerbschlagarbeit.

GJSA-XNiMn23-4 ist speziell für Tieftemperaturzwecke entwickelt worden [7, 16, 68]. Nach [75] hat es das beste Zähigkeitsverhalten aller bekannten Gusseisenwerkstoffe sowohl bei Raum- als auch bei tiefer Temperatur. Das Gefüge bleibt auch nach langzeitigem Halten bei  $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$  stabil austenitisch. Auch metallographische Untersuchungen von Proben nach 2550 h Haltezeit in flüssigem Stickstoff ergaben keinerlei Gefügeänderungen. Das gleiche Ergebnis zeigten Proben, die 20-mal hintereinander schnell von  $+20$  auf  $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$  abgeschreckt und wieder erwärmt wurden.

Im **Bild 48** ist der Einfluss der Temperatur auf die Kerbschlagarbeit von GJSA-XNiMn23-4, der an Proben aus zahlreichen Betriebs- und Laboratoriumsschmelzen ermittelt wurde, dargestellt. Wie zu erkennen, fallen selbst bei  $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$  die Werte gegenüber Raumtemperatur nicht ab. Auch nach mehr als 2 500 h Haltezeit in flüssigem Stickstoff und Kerbschlagprüfung bei  $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$  zeigten die Proben praktisch keinen Abfall [68].

Gussteile aus diesem Werkstoff werden vor allem in Anlagen der Kältetechnik verwendet, wo sie eine Alternative zu kaltzäh austenitischen Stählen darstellen.



**Bild 49:** Abgaskrümmter aus GJSA-XNiSiCr35-5-2 mit eingeschweißtem Dehnungsglied, der einteilig gegossen, anschließend bearbeitet und geschnitten wird, bevor er ohne Vorwärmen geschweißt werden kann (Bild: Monforts, Mönchengladbach)

## 11 Verschleißbeständigkeit und Gleiteigenschaften

Austenitische Gusseisen haben wegen der in der Matrix eingelagerten, fein verteilten Graphitlamellen oder Graphitkugeln ähnlich gute Gleiteigenschaften wie die üblichen grauen Gusseisen. Hinzu kommt, dass sich das austenitische Grundgefüge an der Oberfläche kaltverfestigt und somit widerstandsfähig gegenüber Abrieb und Fressen gleitender Teile wird [1]. Um gute Laufeigenschaften zu erzielen, sollen die Carbide in fein verteilter Form ausgeschieden sein. Grobe Carbideinschlüsse führen zum vorzeitigen Verschleiß des Gegenwerkstoffs. Daraus folgt, dass sich besonders die Sorten mit niedrigem und mittlerem Chromgehalt als Gleitwerkstoffe eignen. Die Brinellhärte von austenitischen Gusseisen mit gutem Widerstand gegenüber Verschleiß und Fressen liegt daher oft im Bereich zwischen 130 und 175 [1]. Eine höhere Härte deutet meist auf grobe Carbide.

Austenitische Gusseisen werden für Zylinderlaufbüchsen in Pumpen und Motoren, für Kolben, Kolbenringträger, Kolbenringe, Lager und Dichtungen im Gegenlauf mit austenitischem Gusseisen, nichtrostendem Edelstahl mit 12 bis 13 % Chrom, NiCu-30Fe oder legiertem Grauguss benutzt. Sie haben sich besonders dann bewährt, wenn der Werkstoff sowohl gegenüber reibendem Verschleiß als auch gegen korrosive Medien beständig sein muss.

Austenitische Gusseisen haben zwar im Gusszustand nur eine mäßige Härte, neigen aber zur Kaltverfestigung. Aus diesem Grunde können gleitende Teile beim Einlaufen an der Oberfläche gut kaltverfestigen. Für manche Anwendungsfälle wie zum Beispiel Zylinderlaufbüchsen haben sich Phosphorgehalte zwischen 0,4 und 1,0 % bewährt.



**Bild 50:** Schleuderguss-Lagerbüchsen für den Chemieanlagenbau - links Rohguss, rechts vorbereitete Abschnitte aus GJSA-XNiCr20-3 und GJLA-X15-6-2 (Bild: Kuhn, Radevormwald)

## 12 Physikalische Eigenschaften

Die austenitischen Gusseisen haben auf Grund ihres hohen Nickelgehalts und ihrer austenitischen Grundmasse besondere physikalische Eigenschaften (**Tabelle 3**), die in mehreren Anwendungsbereichen ausgenutzt werden. Besonders zu nennen sind die Wärmeausdehnung und die Nichtmagnetisierbarkeit.

### 12.1 Thermischer Ausdehnungskoeffizient

Eisen-Nickel-Legierungen sind für eine spezielle mit dem magnetischen Verhalten (Magnetostriktion) zusammenhängende Abhängigkeit des thermischen Ausdehnungskoeffizienten vom Nickelgehalt bekannt (**Bild 51**). Bei etwa 35 % Ni tritt ein ausgeprägtes Minimum auf, das sich mit steigender Temperatur abflacht und zu höheren Nickelgehalten verschiebt. Weitere Legierungselemente wie Kohlenstoff, Chrom, Mangan, Kupfer und vermutlich auch Silicium über die Silicide erhöhen den Ausdehnungskoeffizienten, woraus sich der hohe Ausdehnungskoeffizient der Legierungen mit 10 bis 20 % Ni wie GJSA-XNiCr20-2 oder auch austenitischer Cr-Ni-Stähle erklärt.

Austenitische Gusseisen können also mit definiertem sowohl besonders hohem als auch besonders niedrigem thermischen Ausdehnungskoeffizienten erzeugt werden. Von Interesse ist ein niedriger thermischer Ausdehnungskoeffizient, da die bei

Temperaturwechseln oder Temperaturdifferenzen im Bauteil auftretenden Spannungen dem Ausdehnungskoeffizienten proportional sind.

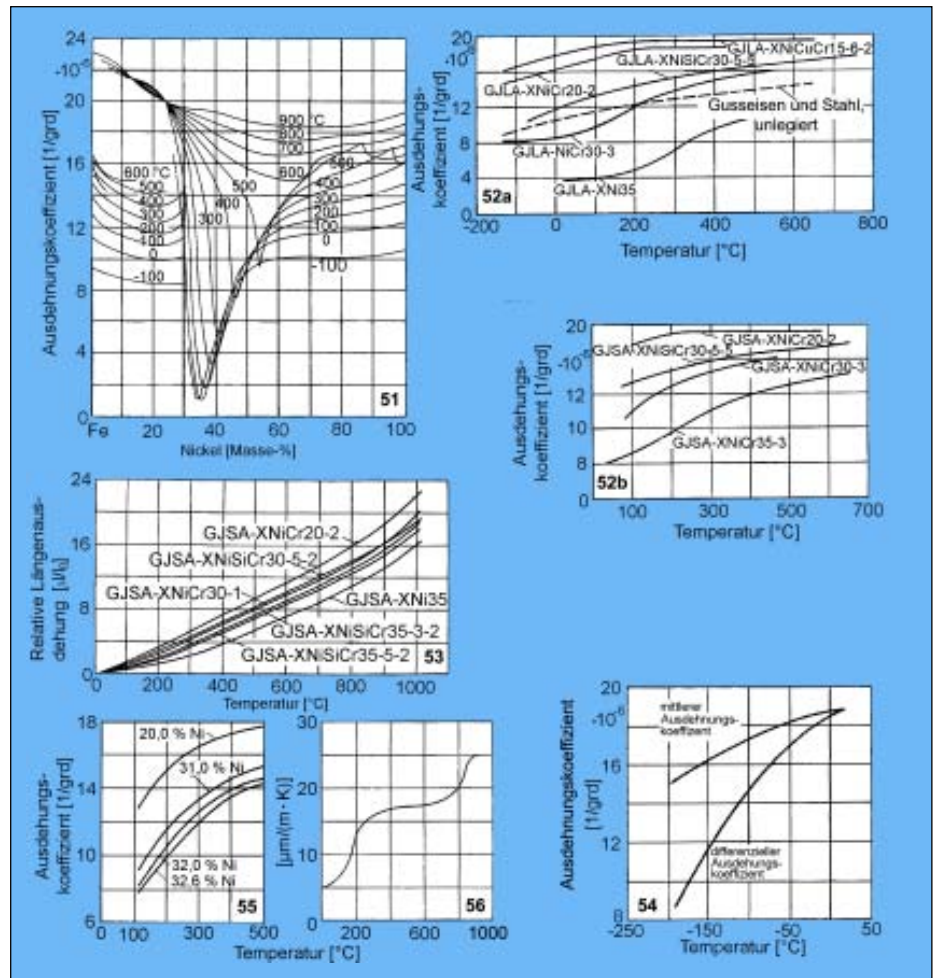
Bei den Ausdehnungskoeffizienten muss aufgrund der starken Änderung mit der Temperatur zwischen dem mittleren Wert, der von Raumtemperatur bis zur angegebenen Temperatur gilt, und dem differentiellen Ausdehnungskoeffizienten, der für die jeweilige Temperatur gilt, unterschieden werden. Im **Bild 52** ist die Temperaturabhängigkeit des mittleren Ausdehnungskoeffizienten für einige austenitische Gusseisen und im **Bild 53** die relativen Längenänderungen solcher Werkstoffe angegeben.

Der mittlere und der differentielle thermische Ausdehnungskoeffizient der kaltzähnen Sorte GJSA-XNiMn23-4 bei verschiedenen Temperaturen sind im **Bild 54** angegeben. Bei mittleren thermischen Ausdehnungskoeffizienten im Bereich von  $9 \text{ bis } 13 \cdot 10^{-6}/\text{K}$  besteht eine steile Abhängigkeit vom Nickelgehalt, die im **Bild 55** dargestellt ist. Innerhalb des Normbereichs für Nickel ändert sich der Ausdehnungskoeffizient bei Raumtemperatur um rund 50 %, wenn der Nickelgehalt an der oberen oder unteren Grenze liegt. Hinzu kommt gegebenenfalls noch ein Einfluss der übrigen Legierungszusammensetzung. Eine Absprache zwischen Besteller und Gießerei ist also erforderlich.

Auch bei den Sorten mit 35 % Ni, die einen besonders niedrigen Ausdehnungskoeffizienten haben, gibt es gravierende Unter-

**Tabelle 26: Thermischer Ausdehnungskoeffizient von GJSA-XNi35 in Abhängigkeit von der Temperatur [18]**

Thermischer Ausdehnungskoeffizient		
Temperatur [°C]	Wert bei der angegebenen Temperatur [mm/(m.K)]	Mittelwert zwischen 20 °C und der angegebenen Temperatur [mm/(m.K)]
50	5,4	5,6
100	6,4	5,6
150	8,3	6,3
200	12,5	7,4
250	14,7	8,8
300	15,5	9,9
350	16,2	10,9
400	16,6	11,6
450	16,7	12,2
500	17,7	12,8
550	16,9	13,3
600	16,6	13,5
650	17,8	13,8
700	18,5	14,2
750	18,7	14,5
800	18,9	14,7
850	23,7	15,1
900	24,6	15,6
950	24,2	16,1



**Bild 51. Isothermen des linearen dilatometrisch bestimmten thermischen Ausdehnungskoeffizienten von Eisen-Nickel-Legierungen [70]**

**Bild 52. Mittlere (von Raumtemperatur bis zur angegebenen Temperatur) thermische Ausdehnungskoeffizienten verschiedener austenitischer Gusseisensorten im Vergleich zu unlegiertem Gusseisen und Stahl [1]**

**Bild 53. Relative Längenänderung einiger austenitischer Gusseisen mit Kugelgraphit beim Aufheizen von 20 bis etwa 1 000 °C entsprechend dem Beiblatt zur DIN 1694**

**Bild 54. Mittlerer und differentieller thermischer Ausdehnungskoeffizient von GJSA-XNiMn23-4 bei verschiedenen Temperaturen [1]**

**Bild 55. Einfluss des Nickelgehalts auf den mittleren thermischen Ausdehnungskoeffizienten bei GJSA-XNiCr30-3 [1]**

**Bild 56. Temperaturabhängigkeit des differentiellen thermischen Ausdehnungskoeffizienten von GJSA-XNi35 [18]**

schiede, je nach dem bei welcher chemischen Zusammensetzung innerhalb des Normbereichs und bei welcher Temperatur gemessen wurde. Wie nach **Bild 51** zu erwarten, nimmt der Ausdehnungskoeffizient mit steigender Temperatur zu. **Tabelle 26** enthält Messwerte des mittleren und des differentiellen Ausdehnungskoeffizienten in Abhängigkeit von der Temperatur. Hierbei steigt der differentielle Ausdehnungskoeffizient, wie die graphische Darstellung im **Bild 56** verdeutlicht, nicht kontinuierlich an, sondern zwischen etwa 400 und 700 °C tritt ein Plateau auf.

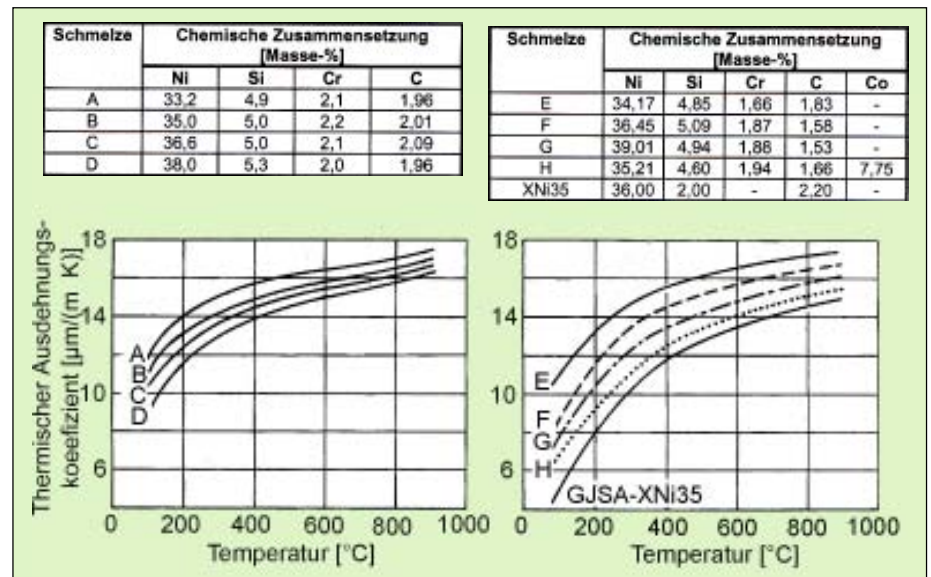
Auch bei dieser Legierung hat die chemische Zusammensetzung einen Einfluss auf

den thermischen Ausdehnungskoeffizienten. **Tabelle 27** enthält die Ergebnisse einer Untersuchung an Probeabgüssen mit meist im Bereich der Norm liegenden chemischen Zusammensetzungen bei verschiedenen Wanddicken. Nickelgehalte unterhalb der Normgrenze von 34 % erhöhen den Ausdehnungskoeffizienten erheblich, aber auch die Wanddicke lässt ihn um bis zu 10 % streuen. Die Graphitform hat kaum einen systematischen Einfluss. Der Kobaltzusatz erfolgte, weil dieses Element nach metallphysikalischen Erkenntnissen den Ausdehnungskoeffizienten bei Fe-Ni-Legierungen senken kann. Die **Tabelle 27** enthält noch Angaben zu weiteren physikalischen Eigenschaften.

Die zusätzlich mit Chrom und Silicium legierte Sorte GJSA-XNiSiCr35-5-2 hat infolge des Legierungseinflusses einen höheren Ausdehnungskoeffizienten als GJSA-XNi35, wie aus **Bild 57** hervorgeht. Bei dieser Legierung ist die Erhöhung der thermo-mechanischen Beständigkeit durch Vermindern der Temperaturwechselspannungen nach Gleichung 7 der Anlass, nach einem möglichst tiefen Ausdehnungskoeffizienten zu streben. Auch hier wirken sich die Temperatur sowie Variationen der chemischen Zusammensetzung insbesondere des Nickelgehalts aus. Die beiden Legierungen G und H mit höherem Nickelgehalt beziehungsweise einem Kobaltzusatz kommen GJSA-XNi35 am nächsten, verursachen aber auch die höchsten Kosten. Eine Verminderung des Siliciumgehalts in Richtung GJSA-XNiCr35-3 setzt den Ausdehnungskoeffizienten ebenfalls herab, verschlechtert aber die Oxidationsbeständigkeit.

## 12.2 Magnetische Eigenschaften

Wie aus **Bild 2** und den Angaben in **Tabelle 3** hervorgeht, ist das magnetische Verhalten der austenitischen Gusseisenwerkstoffe sehr unterschiedlich. Die Sorten mit weniger als 25 % Ni sind nichtmagnetisierbar und daher von Interesse für Bauteile mit geringer Permeabilität. Speziell für Anwendungen, bei denen es auf möglichst geringe Permeabilität ankommt, müssen sowohl Spuren von Martensit als auch ferromag-



**Bild 57.** Temperaturabhängigkeit der thermischen Ausdehnungskoeffizienten von austenitischen Gusseisen vom Typ GJSA-XNiSiCr35-5-2 (D-5S) mit verschiedenen chemischen Zusammensetzungen [57]

netische Gefügebestandteile wie Eisen-Chrom-Carbide ausgeschlossen werden. Unter diesem Gesichtspunkt sind die Sorten GJLA-XNiMn13-7 und GJSA-XNiMn13-7 entwickelt worden. Sie sind allerdings nicht besonders korrosionsbeständig. Werden zusätzlich noch Anforderungen an die Korrosionsbeständigkeit gestellt, dann sind die nichtmagnetisierbaren Sorten mit niedrigen Mangan- und entsprechend

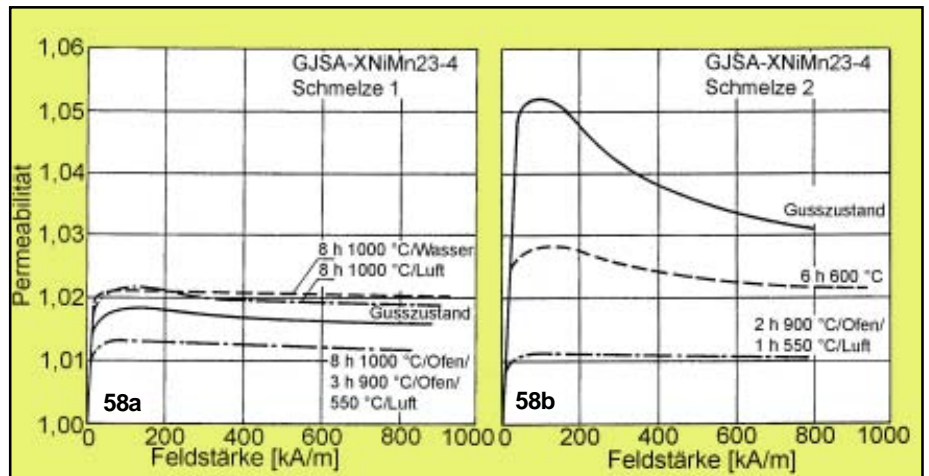
höheren Nickelgehalten und möglichst niedrigen oder keinem Chromgehalt zu wählen, wie GJLA-NiCuCr15-6-2, GJSA-XNiCr20-2, GJSA-XNi22 und GJSA-XNiMn23-4.

Unter welchen Bedingungen eine möglichst niedrige Permeabilität zu erhalten ist, wurde in [8, 9, 72] ausführlich untersucht. Nach diesen Arbeiten ist eine Wärmebehandlung

**Tabelle 27:** Physikalische Eigenschaften von Probeabgüssen aus austenitischen Gusseisen mit 30 bis 36 % Ni bei verschiedenen Wanddicken und Graphitformen [71]

Graphit- ausbildung	Wand- dicke [mm]	Chemische Zusammensetzung [Masse-%]					Thermischer Ausdehnungs- koeffizient [mm/(m×K)]		E-Modul [GPa]	Dichte [g/cm³]	Spezi- fische Wärme [J/(g×K)]	Tempe- raturleit- fähigkeit [mm²/s]	Wärme- leit- fähigkeit [W/(m×K)]					
		Ni	C	Si	Mn	Co	a <sub>100</sub>	a <sub>200</sub>										
kugelig	25	35,6	2,10	1,73	0,51	-	4,4	6,3	108	7,09	0,49	4,83	17					
	25	34,9	2,00	1,72	0,52	-	5,0	6,6	98	7,48								
	25	34,2	1,98	1,89	0,51	-	4,7	7,8	137	7,58	0,46	4,19	15					
kugelig	25	30,7	1,76	2,50	0,45	-	11,4	14,4	118	7,27	0,43	3,56	11					
kugelig	30	31,6	1,59	2,43	0,27	1,40	4,7	6,2	137	7,35	0,48	3,94	14					
vermicular	12	} 33,7	2,05	1,71	0,44	-	5,6	7,5	127	7,45	0,48	4,39	16					
	25						5,8							98	7,70	0,47	4,75	17
	50						5,1							98	7,70	0,47	4,75	17
vermicular	12	} 35,6	2,07	1,89	0,42	-	5,0	7,8	127	7,38	0,52	5,69	21					
	25						4,9							127	7,38	0,52	5,69	21
vermicular	25	} 34,0	1,92	1,44	0,53	-	5,0	7,0	127	7,11	0,52	4,39	16					
	50						5,4							118	7,11	0,52	4,39	16
vermicular	25	} 36,7	1,75	2,47	0,47	2,33	6,2	8,5	127	-	-	-	-					
	50						5,2							127	7,59	0,52	8,64	34
lamellar	12	} 35,7	2,07	1,77	0,45	-	4,7	7,0	78	7,60	0,47	8,42	30					
	25						4,8							78	7,61	0,50	8,56	33
	50						4,3							78	7,59	0,52	8,64	34
lamellar	25	} 35,8	2,31	1,98	0,48	2,54	4,2	6,8	108	7,55	0,43	10,8	35					
	50						3,6							108	7,54	0,43	10,5	34

ratsam. Im **Bild 58** ist die Wirkung verschiedener Behandlungen bei zwei Schmelzen von GJSA-XNiMn23-4 aufgeführt. Ähnliche Wirkungen hat die Wärmebehandlung auch bei GJSA-XNiCr20-2 und GJSA-XNiCr22. Hier kann beispielsweise durch 8 Stunden Glühen bei 1 000 °C und nachfolgende Ofenabkühlung eine Permeabilität von 1,034 mit GJSA-XNiCr20-2 und von 1,016 mit GJSA-XNi22 erreicht werden. Bei GJSA-XNiMn13-7 wird durch 8 Stunden Glühen bei 1 000 °C mit anschließendem Abschrecken in Wasser eine Permeabilität von 1,0055 erreicht. Je nach Art der Legierung ist nach dem Glühen eine Ofenabkühlung oder ein Wasserabschrecken günstiger.



**Bild 58.** Wirkung verschiedener Wärmebehandlungen auf die Permeabilität von zwei Schmelzen von GJSA-XNiMn23-4 [72]

Die Permeabilität spricht empfindlich auf die chemische Zusammensetzung, das Gefüge und die Gussstückoberfläche an [8, 9, 72]. So können zu geringe Gehalte an Nickel oder Mangan vor allem in Seigerungs-zonen zu Martensit und zu hohe Chromgehalte zu Carbiden führen, was beides die Permeabilität steigert. Martensit bildet sich ferner als Folge selektiver Oxidation von Kohlenstoff und Mangan in der Rand-schicht. Hier ist auch der Einfluss ferro-magnetischer Oxide zu berücksichtigen.

Außer in der Elektrotechnik finden nicht-magnetisierbare austenitische Gusseisenwerkstoffe unter anderem dort Anwendung, wo Wärmeentwicklung und Stromverluste durch auftretende Wirbelströme weitgehend vermieden werden müssen oder aus anderen Gründen magnetische Felder nicht beeinflusst werden dürfen.

### 12.3 Elektrische Eigenschaften

Die austenitischen Gusseisen haben einen hohen spezifischen elektrischen Widerstand, der höher ist als bei unlegierten Gusseisen oder Stählen. Er ist bei den Sorten mit Lamellengraphit auf Grund ihrer Struktur höher als bei entsprechenden Sorten mit Kugelgraphit. **Tabelle 3** enthält einige Werte, weitere Angaben werden in [8, 72] gegeben.

Der Temperaturkoeffizient des elektrischen Widerstandes zwischen 20 und 425 °C beträgt bei allen Sorten mit Lamellen- und Kugelgraphit  $0,4 \cdot 10^{-3}$ .

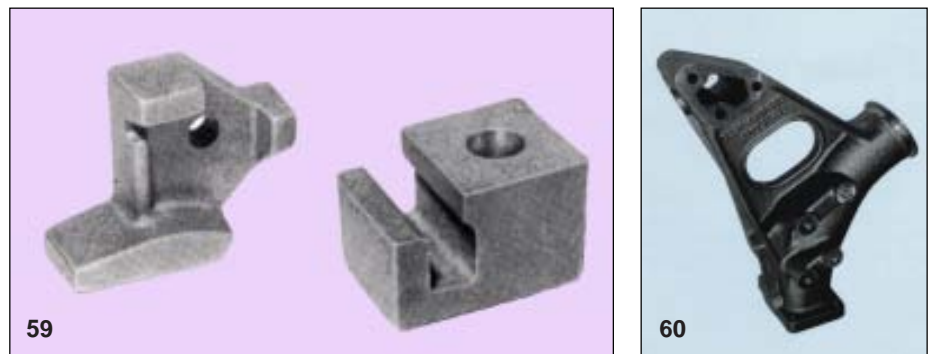
### 12.4 Wärmeleitfähigkeit

Die Wärmeleitfähigkeit von austenitischen Gusseisen ist aufgrund des hohen Gehalts an Legierungselementen wesentlich niedriger als bei unlegierten Gusseisen mit Lamellen- bzw. Kugelgraphit. Sie beträgt für die Sorten mit Lamellengraphit 30 bis 42 W/(m•K), wobei Unterschiede nach Legierungszusammensetzung und Graphitbildung auftreten. Für die Sorten mit Kugelgraphit wird eine mittlere Wärmeleitfähigkeit von 12,6 W/(m•K), angegeben, die damit noch etwas geringer ist als die von austenitischem Stahl. Anhaltswerte für die Wärmeleitfähigkeit sind in **Tabelle 3** angegeben, Messwerte für GJSA-XNi35 auch in **Tabelle 27**.

### 12.5 Dämpfungsfähigkeit

Gusseisen mit Lamellengraphit haben bekanntlich eine hohe Dämpfungsfähigkeit. Nach einer Vergleichsuntersuchung [78] hat GJLA-XNiCuCr15-6-2 eine besonders hohe Dämpfungsfähigkeit, die die höchste von allen Eisenwerkstoffen ist. **Tabelle 28** enthält die Versuchsergebnisse. Worauf die hohe Dämpfungsfähigkeit dieser Sorte zurückzuführen ist, bleibt unklar, da das andere untersuchte austenitische Gusseisen mit Lamellengraphit, das GJLA-XNiMn13-7 mit reduziertem Nickelgehalt entspricht, den gleichen Wert der Dämpfungsfähigkeit wie übliches Gusseisen mit Lamellengraphit aufweist. Möglicherweise spielt der Kupfergehalt bei GJSA-XNiCuCr-15-6-2 eine Rolle.

**Bild 59:** Hochtemperaturbeständige Halteklemmen aus GJSA-X20-2 (Foto: Buchholz, Vienenburg)  
**Bild 60:** Turboladerabgaskrümmter aus GJSA-XNiSiCr35-5-2, Masse 14 kg (Buchholz, Zweibrücken)



**Tabelle 28:** Dämpfungsfähigkeit (logarithmisches Dekrement) verschiedener Gusseisensorten [72]

Werkstoff	Chemische Zusammensetzung [Masse-%]								Härte HV	Zugfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	Dämpfungsfähigkeit Logar. Dekrement
	C	Si	Mn	Ni	Cr	Cu	S	P			
GJL	3,24	2,32	0,54	-	-	-	0,10	0,710	215	210	0,07680
GJN-HV550 (Ni-Hard)	3,35	0,68	0,55	5,20	2,39	-	0,14	0,360	655	-	0,00990
Ferritisches GJS	3,20	1,90	0,30	0,59	-	-	0,01	0,074	147	380	0,05802
Perlitisches GJS	3,39	1,87	0,33	0,82	-	-	0,01	0,060	265	630	0,02950
GJMB	2,30	1,01	0,37	-	-	-	0,09	0,060	163	336	0,05802
GJSA-XNiCuCr15-6-2	3,20	1,65	1,10	14,70	1,98	6,50	0,03	0,030	149	210	0,34840
NoMag	3,20	2,00	6,50	10,50	-	-	0,04	0,350	140	210	0,07680

# Anhang: Austenitische Gusseisensorten im Überblick

## **GJLA-XNiCuCr15-6-2**

Älteste Sorte der austenitischen Gusseisen.  
Gute allgemeine Korrosionsbeständigkeit in Alkalien, verdünnten Säuren, Meerwasser und Salzlösungen, aber keine gute Beständigkeit gegen Spannungsrisskorrosion;  
gute Gleiteigenschaften und Verschleißbeständigkeit durch Kaltverfestigung der Randschicht;  
mäßige Hitzebeständigkeit wegen innerer Oxidation;  
infolge des Lamellengraphits geringe Festigkeitseigenschaften und Zähigkeit;  
hoher thermischer Ausdehnungskoeffizient, hohe Dämpfungsfähigkeit, bei niedrigem Chromgehalt nichtmagnetisierbar;  
preiswerte Legierung, relativ geringe Fertigungskosten.

### **Anwendung:**

Kolbenringträger für Leichtmetallkolben (Hauptanwendung), sonst gering mechanisch beanspruchte korrosionsbeständige Bauteile, Buchsen, nichtmagnetisierbare Teile.

## **GJSA-XNiCr20-2**

Häufigste Sorte der austenitischen Gusseisen mit Kugelgraphit.  
Gute allgemeine Korrosionsbeständigkeit in Alkalien, verdünnten Säuren, Meerwasser und Salzlösungen, bei Gefahr von Spannungsrisskorrosion aber unbedingt spannungsarm glühen;  
gute Hitzebeständigkeit, bei Molybdänzusatz weiter erhöhte Warmfestigkeit;  
gute Gleiteigenschaften und Verschleißbeständigkeit;  
hoher thermischer Ausdehnungskoeffizient;  
Festigkeit, Korrosions-, Hitze- und Erosionsbeständigkeit einerseits sowie Zähigkeit und Bearbeitbarkeit andererseits können durch Einstellung des Chromgehalts verändert werden;  
bei niedrigem Chromgehalt nichtmagnetisierbar.

### **Anwendung:**

Pumpen allgemein und für Seewasser, Ventile, Kompressoren, Turboladergehäuse, Abgaskrümmen, nichtmagnetisierbare Gussstücke.

## **GJSA-XNiMn23-4**

Kaltzähe Sorte, bleibt bis  $-196\text{ °C}$  zäh, mechanische Eigenschaften, Korrosions- und Hitzebeständigkeit ähnlich wie bei GJSA-XNiCr22

### **Anwendung:**

Gussstücke für die Kältetechnik

## **GJSA-XNiCrNb20-2**

Schweißgeeignete Variante von GJSA-XNiCr20-2, Eigenschaften wie diese.

### **Anwendung:**

Wie GJSA-XNiCr20-2 für alle Gussstücke, die fertigungs- oder konstruktionsgeschweißt werden sollen.

## **GJSA-XNiCr22**

Hohe Duktilität und Zähigkeit bis etwa  $-100\text{ °C}$ ;  
geringere Korrosions- und Hitzebeständigkeit als GJSA-XNiCr20-2; hoher Ausdehnungskoeffizient;  
nicht magnetisierbar; schwierig zu gießen und zu schweißen.

### **Anwendung:**

Wie GJSA-XNiCr20-2, wenn erhöhte Anforderungen an Zähigkeit bis zu tieferen Temperaturen gestellt werden.

## **GJSA-XNiCr35**

Sehr niedriger thermischer Ausdehnungskoeffizient;  
korrosionsbeständig; mäßig hitzebeständig.

### **Anwendung:**

Maßbeständige Teile für Werkzeugmaschinen, wissenschaftliche Instrumente, Formen

## **GJSA-XNiSiCr35-5-2**

Sorte mit der höchsten Hitze- und Temperaturbeständigkeit;  
besonders hohe Zunderbeständigkeit;  
bei Molybdänzusatz weiter erhöhte Warmfestigkeit;  
Niedriger thermischer Ausdehnungskoeffizient.

### **Anwendung:**

bei erhöhten Anforderungen an die Hitzebeständigkeit, vor allem Abgaskrümmen und Turboladergehäuse, Gasturbinengehäuseteile.

## **GJLA-XNiMn13-7**

Nichtmagnetisierbar; geringe Korrosions- und Hitzebeständigkeit

### **Anwendung:**

Nichtmagnetisierbare Gussstücke, zum Beispiel Druckdeckel für Turbogeneratoren, Gehäuse für Schaltanlagen, Isolierflansche, Klemmen, Durchführungen.

## **GJSA-XNiMn13-7**

nichtmagnetisierbar, ähnlich GJLS-XNiMn13-7, aber bessere mechanische Eigenschaften

### **Anwendung:**

wie GJLS-XNiMn13-7 bei erhöhten Anforderungen.

## **GJSA-XNiCr30-3**

Höhere Korrosions-, Hitze- und Temperaturwechselbeständigkeit, aber geringere Duktilität als GJSA-XNiCr20-2;  
bei Molybdänzusatz weiter erhöhte Warmfestigkeit;  
durch Einstellen des Nickelgehalts thermischer Ausdehnungskoeffizient im mittleren Bereich einstellbar;  
magnetisierbar.

### **Anwendung:**

Wie GJSA-XNiCr20-2, wenn erhöhte Anforderungen an die Korrosionsbeständigkeit gestellt werden, Teile mit definiertem mittleren thermischen Ausdehnungskoeffizienten.

## **GJSA-XNiSiCr30-5-5**

Hohe Korrosions-, Hitze- und Temperaturwechselbeständigkeit;  
besonders hohe Zunderbeständigkeit;  
gute Verschleißbeständigkeit, aber geringere Duktilität als GJSA-XNiCr30-3;  
bei Molybdänzusatz weiter erhöhte Warmfestigkeit;  
durch Einstellen des Nickelgehalts thermischer Ausdehnungskoeffizient im mittleren Bereich einstellbar; magnetisierbar.

### **Anwendung:**

Bei erhöhten Anforderungen an die Hitzebeständigkeit und Verschleißbeständigkeit bei definiertem mittleren thermischen Ausdehnungskoeffizienten, Ofenbauteile.

## **GJSA-XNiCr35-3**

Niedriger thermischer Ausdehnungskoeffizient;  
besser korrosionsbeständig als GJSA-XNiCr35;  
gut hitzebeständig, Warmfestigkeit kann durch Mo erhöht werden.

### **Anwendung:**

Gegen Temperaturwechsel beständige Teile, Formen.

## Schrifttum

- [1] Die Ni-Resist-Gusseisenwerkstoffe. Herausgeber: International Nickel, Düsseldorf 1968.
- [2] Nickel, O.: Austenitisches Gusseisen. konstruieren + giessen 9 (1984) H. 4., Sonderausgabe.
- [3] Engineering Properties and Applications of the Ni-Resists and Ductile Ni-Resists. NiDI Nickel Development Institute, Birmingham 1987.
- [4] Röhrig, K.: Austenitisches Gusseisen – Eigenschaften und Anwendung. konstruieren + giessen 18 (1983) H. 3, S. 4 - 29.
- [5] Covert, R., J. Morrison, K. Röhrig u. W. Spear: Properties and Applications Ni-Resist and Ductile Ni-Resist Alloys. Broschüre No. 11018, NiDI Nickel Development Institute, Birmingham 1998.
- [6] The susceptibility of type D2 Ni-Resist to stress corrosion cracking in warm seawater and the influence of stress relief heat treatment, part 1. Bericht der BCIRA an NiDI Nickel Development Institute, Birmingham Juni 1988.
- [7] Rickards, J.: The low temperature properties of austenitic cast iron. BCIRA J. 1970.
- [8] Dietrich, H.: Die magnetischen Eigenschaften von Gusseisen mit Kugelgraphit. VDI-Berichte (1961) Nr. 49, S. 47 – 55.
- [9] Dietrich, H.: Einfluss der Gießbedingungen auf die magnetischen Eigenschaften von nicht-magnetisierbaren Gusseisen. Nickelberichte 23 (1965) S. 279 – 290.
- [10] Franson, I. A., u. R. D. Schelleng: The Effect of Composition on the Mechanical Properties of Austenitic Ductile Cast Iron Containing about 20 % Nickel. Trans. Amer. Foundrym. Soc. 70 (1962) S. 1095 - 1100.
- [11] Dahl, O. u. F. Pawlek: Z. Phys. 94 (1939) S. 504 – 522, vgl. Houdremont, E.: Handbuch der Edeldahlkunde, Bd. 1. Springer Verlag Berlin, 1956.
- [12] Morrison, J. C.: Austenitisches Gusseisen mit Kugelgraphit GGG-NiCrNb 20 2 - Hinweise zu Zusammensetzung und Wärmebehandlung von Gußstücken zum Einsatz in Seewasser. Gießerei-Praxis (1997) H. 1/2, S. 6 - 18.
- [13] Morrison, J. C., und K. Röhrig: Erzeugung von Gußstücken aus austenitischen Gusseisen (Ni-Resist). 45 Gießerei-Praxis (1997) H. 17/18, S. 361 - 372.
- [14] Theis, E., u. G. Gawlas: Das Schweißen von austenitischem Gusseisen mit Kugelgraphit. Giesserei 56 (1969) H. 6, S. 140 - 146.
- [15] Modl, E. K.: Austenitische Gusseisenwerkstoffe für hohe und tiefe Temperaturen. Giesserei 51 (1964) H. 18, S. 518 - 527.
- [16] Swales, G. L., u. O. Nickel: Ein neues kaltzähes austenitisches Gusseisen mit Kugelgraphit für die Tieftemperaturtechnik. Giesserei 50 (1963) H. 26, S. 807 - 815.
- [17] Karsay, I., u. R. D. Schelleng: Nickel Alloyed Austenitic Ductile Iron Graphite Structures. Trans. Amer. Foundrym. Soc. 69 (1961) S. 725 - 730.
- [18] Reynaud, A., u. S. Parent-Simonin: Contribution à l'étude des fontes austénitiques SN 35. Fonderie-Fondeur d'aujourd'hui 89 (1989) S. 29 - 37.
- [19] Reynaud, A., u. S. Parent-Simonin: Equilibre Mg - S - Terres rares - Pb et forme du graphite des fontes GS austénitiques. Fonderie-Fondeur d'aujourd'hui 91 (1990) S. 17 - 25, vgl. Gießerei-Praxis 38 (1990) H. 20, S. 343 - 346.
- [20] Church, N. L., M. J. Fiene u. R. A. Depaul: Austenitisches Gusseisen mit Kugelgraphit zur Verwendung bei hohen Temperaturen. Gießerei-Praxis 21 (1973) H. 21, S. 377 - 384.
- [21] Cox, G. J., u. G. N. J. Gilbert: Über den Einfluss von Zeit und Temperatur auf Gefüge und Eigenschaften austenitischer Gusseisenwerkstoffe im Bereich von 350 bis 800 °C. Gießerei-Forschung 21 (1969) H. 3, S. 125 - 132, vgl. Mitteilungen der Zentrale für Gussverwendung, Düsseldorf, H 4, 1969.
- [22] Schelleng, R. D.: Influence of Nickel up to 37 % and Silicon up to 3 % on the Eutectic Carbon Content of Cast Iron. Mod. Castings 37 (1960) H. 6, S. 87 - 89.
- [23] Grant, J. W., u. J. C. Morrison: Herstellung von Gussstücken aus austenitischem Gusseisen mit Lamellen- und Kugelgraphit. Giesserei 60 (1973) H. 4, S. 89 - 97, vgl. British Foundryman 65 (1972) S. 172 - 184.
- [24] Mapaey, F.: Solidification Mode and Feeding Behavior of Austenitic Cast Iron. Trans. Amer. Foundrym. Soc. 110 (2002) S. 1 - 20.
- [25] Abbott, W. K., u. R. W. Cologgi: Effect of Foundry Variables and Composition on Microstructure and Mechanical Properties of Austenitic Ductile Iron Pressure Castings. Trans. Amer. Foundrym. Soc. 70 (1962) S. 1196 - 1209.
- [26] Sengupta, P. K., und D. E. Jordan: Die Schweißbarkeit von austenitischem Gusseisen mit Kugelgraphit. Giesserei 58 (1971) H. 26, S. 801 - 811.
- [27] Stephenson, N.: Improving the weldability of SG Ni-Resist D-2 iron. International Conference Welding of Castings, Bradford, 21. bis 23. September 1976.
- [28] Kallen, W., u. K. Röhrig: Hochleistungsfähige Gusswerkstoffe für Abgaskrümmen und Turboladergehäuse. konstruieren + giessen 28 (2001) H. 4, S. 17 – 39.
- [29] Röhrig, K.: Werkstoffe für Abgaskrümmen und Turboladergehäuse. Gießerei-Praxis (2002) H. 4, S. 137 - 143 und H. 5, S. 159 - 171.
- [30] Dilthey, U., F. Eichhorn u. D. Maser: Untersuchungen der Eigenschaften und der Gefügeausbildung von Reibschweißverbindungen austenitischer Gusseisenwerkstoffe. DVS-Bericht, Düsseldorf 1991, S. 3 – 9.
- [31] Machining and Grinding Ni-Resist Irons and Ductile Ni-Resist Irons. Hrsg.: International Nickel Comp., Inc. Nr. A-242. New York 1964.
- [32] Kämmer, K.: Zerspanbarkeit austenitischer Gusseisenwerkstoffe. konstruieren + giessen (1975) H. 6/7, S. 34 - 39.
- [33] Copson, H. R., und E. A. Tice: Untersuchungen über das atmosphärische Korrosionsverhalten einiger Nickellegierungen. Werkstoffe und Korrosion 15 (1964) H. 8, S. 645 - 652.
- [34] Palmer, K. B.: Resistance of unalloyed and alloyed cast irons to sea-water corrosion. Bericht 1447 der BCIRA, 1981.
- [35] Austenitische Gusseisenwerkstoffe in der chemischen Industrie und der Erdölindustrie. International Nickel, Düsseldorf 1968.
- [36] H. M. Shalaby, S. Attari, W. T. Riad u. V. K. Gouda: Erosion-Corrosion Behavior of Some Cast Alloys in Seawater. Corrosion 48 (1992) H. 3, S. 206 - 217.
- [37] Todd, B., u. P. A. Lovett: Marine Engineering Practice, Vol. 1. The Institute of Marine Engineers, London.
- [38] Werkstoffe für Meerwasseranlagen. International Nickel, Düsseldorf 1968.
- [39] Miyasaka, M., u. N. Ogure: Stress corrosion cracking of austenitic cast irons in seawater and brine, and its prevention, Paper 324, Corrosion 86, NACE, Houston, Texas, 1986.
- [40] Dawson, J. V., u. B. Todd: The influence of carbide content on the stress corrosion cracking of ductile (SG) Ni-Resist cast iron in warm seawater. NiDI Nickel Development Institute 1987.
- [41] Tischner, H.: Korrosionsverhalten von Gusslegierungen im Vergleich zu entsprechenden Walz- und Schmiedequitäten. VDI-Ber. Nr. 600.2, Düsseldorf 1986, S. 127 - 171.
- [42] Europäische Patentanmeldung 85107588.7 vom 19.06.85, Veröffentlichungs-Nr. 0 169 374.
- [43] Bäuml, A.: SpRK an austenitischem Gusseisen. Nach: Ergebnisse des Forschungs- und Entwicklungsprogramms "Korrosion und Korrosionsschutz". Werkstoffe und Korrosion 44 (1993) S. 107 – 108.
- [44] Fischer, E., F. Mahning u. H. Walter: Betriebsfestigkeit von Gusseisen mit Kugelgraphit (Sphäroguss) unter Korrosionseinfluss. konstruieren + giessen 13 (1988) H. 2, S. 16 - 24.
- [45] Palmer, K. B.: Corrosion fatigue properties of austenitic cast irons. Bericht 1137 der BCIRA, 1973.
- [46] Sedriks, A. J., u. K. L. Money: Corrosion fatigue properties of nickel containing materials in sea water. Interner Bericht der International Nickel Ltd.
- [47] LaQue, F. L., u. H. R. Copson: Corrosion Resistance of Metals and Alloys. New York, 1963.
- [48] Katz, W.: Gießen für die Chemie. VDI Verlag, Düsseldorf 1974.
- [49] Michael, D. G., D. J. Nation u. D. G. Offord: Applications of High-Silicon, Flake-Graphite Austenitic Cast Iron for Valves. Foundry Trade J. 114 (1963) S. 158 - 159.
- [50] Cox, G. J., u. G. N. J. Gilbert: Structural Stability, Growth and Scaling Properties of Austenitic Cast Irons at Temperatures up to 800°C. Iron & Steel 40 (1967) S. 351 - 356, 378 - 384, 428 - 433.
- [51] Cox, G. J.: Zeitstandverhalten und Hitzebeständigkeit austenitischer Gusseisenarten

mit Kugelgraphit bei Temperaturen bis 725 °C. Giesserei 58 (1971) H. 26, S. 805 - 811.

[52] Cox, G. J.: Spheroidal Graphite Austenitic Irons For Use At High Temperatures. The Brit. Foundryman 63 (1970) S. 1 - 14.

[53] Röhrig, K.: Hitzebeständiges Gusseisen mit Kugelgraphit. Mitteilungen der Zentrale für Gussverwendung, Düsseldorf 1970.

[54] Röhrig, K.: Hitzebeständiges Gusseisen mit Kugelgraphit mit 4 % Si und 1 bis 3 % Mo. Gießerei 61 (1974) H. 8, S. 198 - 202.

[55] Röhrig, K.: Hitzebeständiges GGG mit 4 bis 6 % Si - Eigenschaften und Anwendungen. konstruieren + gießen 3 (1978) H. 4, S. 3 - 16.

[56] Isleib, C. R.: Elevated Temperature Properties of Ductile Iron. Ductile Iron Soc., 1980, S. 9 - 16.

[57] Church, N. L., M. J. Fiene u. R. A. Depaul: An Austenitic Ductile Iron for Elevated Temperature Use. Technical Paper, International Nickel Company, 1972.

[58] Fontaine, P. I.: Ni-Resist Type D5S - An Improved Material for Turbocharger Housings. SAE Technical Paper 800016, 1980.

[59] Spear, W.: A Low Coefficient Austenitic Ductile Iron for Engine Applications. SAE 1987.

[60] Broschüre der Georg Fischer AG „Warmfeste Werkstoffe“, Schaffhausen 1980.

[61] Data Sheets on the Properties of Steel Castings 15. SCRATA, 1978.

[62] Hasse, S.: Duktiles Gusseisen. Fachverlag Schiele & Schön, Berlin 1996.

[63] Schubert, J.: Einfluss der Legierungszusammensetzung auf das Zeitstandverhalten der austenitischen Stahlgussorten GXCrNiNb19-11 und GX5CrNiMoNb19-11-2 aus dem Forschungsprogramm P195. 23. Vortragsveranstaltung "Langzeitverhalten warmfester Stähle und Hochtemperaturwerkstoffe". Vortragsband, Düsseldorf 2000, S. 146-155.

[64] Drefahl, K., H. Otten u. W. Wunder: Zeitstandverhalten von austenitischen Ni-Resist-Gusseisenwerkstoffen mit Kugelgraphit. Nickel-Berichte 25 (1967) S. 361 - 367.

[65] Schelleng, R. D., u. J. T. Eash: Effect of chemical composition on the elevated temperature properties of ductile iron. Proc. Amer. Soc. Test. Mat. 57 (1957) S. 929 - 946.

[66] Hockel, K. G. L., und M. Wenzel: Der Abgaskrümmen von Personenwagenmotoren als

Entwicklungsaufgabe. MTZ Motortechnische Zeitschrift 45 (1984) H. 10, S. 21 - 26.

[67] Sefing, F. G.: Engineering Applications of Controlled Expansion Alloys. Iron Age Nr. 159, 1947.

[68] Träger, H.: Über die mechanischen Eigenschaften eines kaltzähen austenitischen Gusseisenwerkstoffes mit Kugelgraphit. Giesserei 51 (1964) H. 18, S. 527 - 531

[69] Matting, A, u. U. Krüger: Ermittlung der mechanischen Eigenschaften von Gusseisenwerkstoffen bei tiefen Temperaturen. Giesserei-Forschung 22 (1970) H. 1, S. 29 - 37.

[70] Houdremont, E.: Handbuch der Edelmetallekunde, Bd. 1. Springer Verlag, Berlin 1956.

[71] Noguchi, T., T. Muroga u. K. Miyona: Thermal Deformation Characteristics of Low Thermal Expansion Cast Irons with Various Graphite Shapes. Trans. Amer. Foundrym. Soc. 98 (1990) S. 287 - 293.

[72] Dietrich, H.: Nichtmagnetisierbare Gusseisenwerkstoffe und ihre Prüfung. Giesserei, techn.-wiss. Beihefte 15 (1963) H. 1, S. 45 - 58 und H. 2, S. 59 - 73.

[[73] Fullwood, T.: Damping Capacities of Cast Irons in Air and High Vacuum. Foundry Trade Journal 1968 (September) S. 439 - 447.