

# Guss aus hochkorrosionsbeständigen Nickel-Basislegierungen

In vielen Bereichen der chemischen Verfahrenstechnik und der Umweltechnik reicht die Korrosionsbeständigkeit der üblichen hoch legierten Edelstähle nicht mehr aus. Ein Ausweg ist der Einsatz von Nickel-Basislegierungen.

## 1 Einleitung

Nickel-Basislegierungen sind im Prinzip dadurch gekennzeichnet, dass ihre Grundmasse aus Nickel besteht. Die exakte Abgrenzung zwischen hoch legierten Sonder-Edelstählen und eisenhaltigen Nickelbasislegierungen ist allerdings etwas verschwommen und oft eher rein formaler Natur. Bei beiden korrosionsbeständigen Werkstoffgruppen besteht das Grundprinzip darin, dass in der Grundmasse Legierungselemente, die die Korrosionsbeständigkeit verbessern, gelöst und gleichmäßig verteilt sind.

Ausscheidungen und Seigerungen sind schädlich, da sie zu örtlichen Korrosionsangriffen führen können und auch die mechanischen Eigenschaften beeinträchtigen. Gegenüber Eisen als Grundmasse bietet Nickel zwei große Vorteile. Der eine ist, dass Nickel selbst bereits ein korrosionsbeständiger Werkstoff ist. Der zweite ist das gute Lösungsvermögen von Nickel für andere für die Korrosionsbeständigkeit wichtige Elemente wie Chrom, Molybdän und Kupfer. Nickel ist in dieser Beziehung wesentlich gutmütiger als Eisen.

Eine zweite große Gruppe der Nickel-Basislegierungen sind Hochtemperaturwerkstoffe. Hier geht es sowohl um Beständigkeit gegen Verzunderung und andere Arten der Hochtemperaturkorrosion als auch um höchste Warmfestigkeit.

Die hier geforderten Eigenschaften werden durch entsprechende Legierungszusammensetzungen und verschiedene Verfestigungsmechanismen erreicht. Die Korrosionsbeständigkeit in wässrigen Medien spielt hierbei keine Rolle, obwohl einige Legierungen sowohl als korrosionsbeständige als auch warmfeste Werkstoffe Verwendung finden. Im vorliegenden Beitrag soll ausschließlich auf die korrosionsbeständigen Nickel-Basislegierungen eingegangen werden.

## 2 Werkstoffentwicklung

Die Entwicklung der Nickel-Basislegierungen folgte den Anforderungen des Marktes, der immer anspruchsvoller wurde und sich zugleich ausweitete. Zu den ursprünglichen Anwendungsbereichen in der chemischen Verfahrenstechnik und Düngemittelindustrie kamen bald die Petrochemie, die Lebensmittelverarbeitung, die Meerestechnik und in den letzten Jahren in steigendem Maße die Umweltschutztechnik. Ein weiterer Impuls kam von den Fortschritten bei der metallurgischen Verfahrenstechnik, die es erlaubte, kostengünstig immer reinere und damit duktilere, beständigere und besser schweißgeeignete Werkstoffe zu erzeugen.

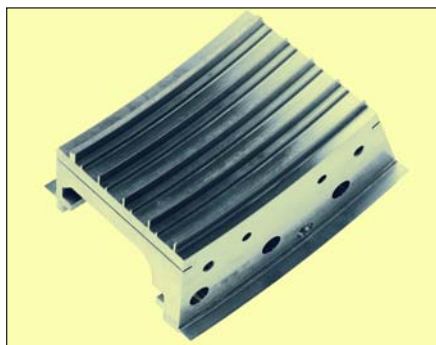
Die Werkstoffentwicklung erfolgte in den Labors zahlreicher Hersteller, unter denen beispielhaft Inco, Haynes und VDM genannt werden sollen. Die Hersteller versuchten, die neu entwickelten Legierungen durch Patente zu schützen und zugleich durch ebenfalls geschützte möglichst griffige Markennamen am Markt zu etablieren. Nach Ablauf des Patentschutzes für eine Legierung oder nach Erwerb von Lizenzen kamen weitere Hersteller mit eigenen Bezeichnungen hinzu. Die Folge ist, dass es heute eine etwas verwirrende Vielzahl verschiedener Bezeichnungen gibt, bei denen es auf den ersten Blick nicht immer klar ist, ob es sich um einen bestimmten Werkstoff, einen

Werkstofftyp oder ein Produkt handelt. Oft werden auch Gusswerkstoffe mit dem Namen des entsprechenden Knetwerkstoffes bezeichnet. Die Normung konnte mit dieser Entwicklung nicht Schritt halten, vor allem, da Nickel-Basislegierungen von vornherein ein Produkt für den Weltmarkt waren und sind, während die Normung bis vor knapp 20 Jahren vor allem eine nationale Angelegenheit war. Die meisten Nickel-Basislegierungen haben deutsche Werkstoffnummern und Kurzzeichen, aber in der Regel bezieht man sich auf die in den Prospekten und Werkstoffdatenblättern der Hersteller und Lieferanten angegebenen Werte.

Im Bereich der gegossenen Nickel-Basislegierungen ist die amerikanische Norm **ASTM 494** weltweit von Bedeutung. Es gibt zwar eine **ISO-Norm 12725:1997** „Nickel und Guss aus Nickellegierungen“, die aber so gut wie nicht benutzt wird. Die **Tabelle 1** enthält eine Übersicht der häufigsten Gusslegierungen und ihrer Bezeichnungen auf Basis der **ASTM 494**.

Bei den in Normen oder durch Werkstoffnummern definierten Legierungen muss man berücksichtigen, dass ihre Zusammensetzung einen relativ breiten Bereich umfasst. Für optimale Gebrauchseigenschaften bei bestimmten Anwendungen muss dieser Bereich meist eingengt werden. Erfahrene Hersteller besitzen das entsprechende Know-how. Die Ausnutzung des durch die Norm erlaubten Bereichs, zum Beispiel mit teuren Legierungselementen an der unteren Grenze und unerwünschten Beimengungen, deren Entfernung schwierig und kostspielig ist, an der oberen, kann im Einsatz zu Problemen führen.

Zudem hinkt die Norm oft der technischen Entwicklung hinterher. Die Legierung „Hastelloy C“ (CW12MW) beispielsweise wurde um 1930 am Markt eingeführt. Trotz unbestreitbarer Erfolge kam es immer wieder zu Schwierigkeiten, da es trotz aller Bemühungen nicht gelang, Gussteile mit dem gleichen Korrosionsverhalten wie Bauteile aus der äquivalenten Knetlegierung treffsicher herzustellen. Erst rund



**Bild 1:** Dichtungselement für Gasturbinen aus Ni-Cr-Mo-Legierung gemäß Kundenvorgabe im Furanharzsand gefertigt (Bild: Wolfensberger, Bauma (CH))

**Tabelle 1: Wichtige gegossene Nickelbasislegierungen, häufigste Handelsnamen und typische Anwendungen**  
(Die Handelsnamen entsprechen meist denen der Knetlegierungen)

Typ	ASTM A494 Bezeichnung	Handelsname	Werkstoff-Nr.	Kurzname	ISO 17730	typische Anwendungen
Ni	CZ100		2.4170 2.4175 2.4180	G-Ni95 G-Ni93C G-Ni90Si	NC-1000	heiße Alkalien heiße Alkalien heiße Alkalien heiße Schwefelsäure
NiSi		Hastelloy D <sup>1)</sup>			NC-8000	
NiCu	M35-1 M35-2 M30H M25S M30C	Monel Monel Monel S Monel	2.4365 2.4367 2.4367	G-NiCu30 Nb G-NiCu30 Nb G-NiCu30Si3 G-NiCu30Si4	NC-2000 NC-2500	Seewasser, Alkalien Seewasser, Alkalien Seewasser, Alkalien, Verschleiss Seewasser, Alkalien, Verschleiss Seewasser, Alkalien
NiCrFe	CY40 CU5MCuC	Inconel 600 <sup>2)</sup> Incoloy 825CP <sup>2)</sup>	2.4816 2.4858	G-NiCr16 Fe NiCr21Mo	NC-6000 NC-7000	interkristalline Korrosion und SpRRK organische, Schwefel- und Flusssäure
FeNiCr		Alloy 31 <sup>3) 4)</sup>	1.4562			basische und saure chloridhaltige Medien
NiCrMo	CW12MW CW6M CW2M CX2MW CX2M CW6MC	Hastelloy C <sup>1)</sup> Hastelloy C modified <sup>1)</sup> Hastelloy C-4 <sup>1)</sup> Hastelloy C-22 <sup>1)</sup> Inconel 22 <sup>2)</sup> Alloy 59 <sup>3) 4)</sup> Inconel 625 <sup>2)</sup> MAT 21, C21C <sup>5) 6)</sup> Hastelloy G30C Hastelloy C2000C	2.4883 (2.4686) 2.4883 (2.4686) 2.4686 2.4602 2.4605 2.4856  2.4643 2.4675	G-NiMo16CrW  G-NiMo17Cr NiCr21Mo14W G-NiCr23Mo16 NiCr22Mo9Nb  NiCr23Mo16Cu	NC-5200 NC-5400 NC-5000  NC-4500	oxidierende und gemischte Säuren oxidierende und gemischte Säuren oxidierende und gemischte Säuren oxidierende und gemischte Säuren oxidierende und gemischte Säuren Säuren, SpRRK, Spaltkorrosion oxidierende und gemischte Säuren, halogenidhaltige Medien oxidierende Säuren heiße, konzentrierte Schwefelsäure und Lochfraßkorrosion.
Ni-Mo	N12MV N7M, N3M	Hastelloy B <sup>1)</sup> Hastelloy B2 <sup>1)</sup>	2.4810 2.4685	NiMo30 G-NiMo28	NC-3000 NC-3500	heiße Salzsäure heiße Salzsäure
NiSnBi	CY5SnBiM	Waukesha 88 <sup>7)</sup>				Fressbeständigkeit

Markennamen der Firmen: <sup>1)</sup> Haynes Alloys International, <sup>2)</sup> INCO Alloys, <sup>3)</sup> VDM, <sup>4)</sup> Schmidt+Clemens, <sup>5)</sup> Mitsubishi Materials, <sup>6)</sup> Otto Junker, <sup>7)</sup> Waukesha Corp

40 Jahre später stellte man fest, dass diese Fehlschläge nicht auf der Inkompetenz der Gießereien, sondern auf einem „Konstruktionsfehler“ der Legierung selbst beruhten. Bei der Abkühlung in der Gießform scheidet sich neben Carbiden eine an Molybdän und Wolfram reiche  $\delta$ -Phase aus, die durch das übliche Lösungsglühen nicht zu beseitigen ist. Daraufhin wurden neue Legierungen wie „Hastelloy C4“ und schließlich „Hastelloy C22“ entwickelt. Die alte in der Fertigung relativ billige Legierung hat jedoch ein scheinbar ewiges Leben. Sie ist nicht nur noch in der **ASTM-Norm A494** enthalten, sondern geistert auch in vielen Zeichnungen, Spezifikationen und Datensammlungen herum und wird aus diesem Grund immer wieder bestellt, was nur allzu oft im Einsatz zu Ausfällen von Gussteilen, die allerdings alle Anforderungen der Norm erfüllen, führt.



**Bild 2: Düsenring aus NiCr22Mo9Nb (Inconel 625, W.-Nr. 2.4856) im Keramikformverfahren gefertigt (Bild: Edelstahlwerke Schmees Langenfeld/Pirna)**

Fast alle Nickel-Basislegierungen wurden ursprünglich als Knetwerkstoffe entwickelt. Wenn Bedarf für Fittings, Bauteile für Armaturen, Pumpen usw. auftrat, wurden sie als Gusslegierungen verwendet und unter Umständen entsprechend modifiziert. Typische Änderungen gegenüber den Knetwerkstoffen sind höhere Sili-cium- und auch Mangangehalte zur Verbesserung der Gießeigenschaften oder die Verwendung von Niob anstelle von Titan. Oft sind auch die Gehalte an Kohlenstoff und zulässigen Begleitelementen etwas höher.

### 3 Legierungsgruppen

Die für die Beständigkeit der Legierungen wichtigsten Legierungselemente des Nickels sind Kupfer, Chrom und Molybdän. Daraus ergeben sich insgesamt fünf Legierungsgruppen:

- Rein-Nickel,
- Ni-Cu,
- Ni-Cr-Fe,
- Ni-Cr-Mo,
- Ni-Mo.

Nickel ist besonders beständig gegen konzentrierte und heiße Alkalien. Chrom steigert die Beständigkeit des Nickels gegen oxidierende Säuren. Kupfer erhöht die Seewasserbeständigkeit und die Beständigkeit in reduzierenden Säuren, während Molybdän vor allem in allen reduzierenden Säuren günstig ist. Von großer Bedeutung ist Molybdän in Kombination mit Chrom für die Beständigkeit gegen chloridinduzierte Lokalkorrosionsarten wie Lochfraß, Spaltkorrosion und Spannungsrissskorrosion (SpRRK). In dieser Hinsicht wird es durch Wolfram und neuerdings auch Stickstoff ergänzt.

Die wichtigste Gruppe mit dem größten Anwendungsbereich sind die Ni-Cr-Mo-Legierungen, da sie sowohl in oxidierenden wie in reduzierenden Säuren beständig sind und einen hohen Widerstand gegen chloridinduzierte Lokalkorrosionsarten wie Lochfraß, Spaltkorrosion und Spannungsrissskorrosion aufweisen. Die Ni-Cr-Fe-Legierungen sind vergleichsweise preisgünstig und liegen zwischen den Edelstählen und den Nickel-Basislegierungen. Sie zeichnen sich durch gute Beständigkeit gegen chloridinduzierte Lokalkorrosionsarten und Spannungsrissskorrosion aus. Die Nickel-Molybdän-Legierungen wurden vor allem zum Einsatz in heißer Salzsäure entwickelt und sind hier allen anderen Legierungstypen überlegen.

In der **Tabelle 1** sind die wichtigsten gegossenen Nickel-Basislegierungen enthal-



**Bild 3: Gehäuse für Ovalradzähler aus NiNiMo30 (Hastelloy B, W.-Nr. 2.4810) (Bild: Otto Junker, Simmerath)**

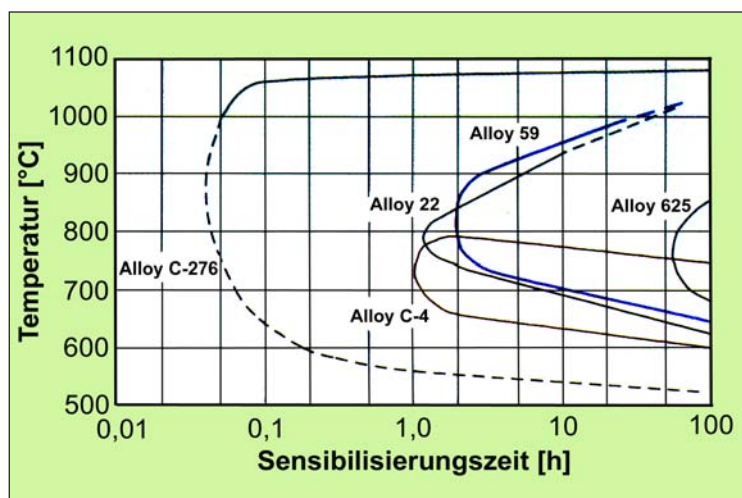
ten und in der **Tabelle 2** ihre chemischen Zusammensetzungen aufgeführt. Wie bereits erwähnt, werden die hier angegebenen Bereiche für die Zusammensetzung vor allem der genormten Legierungen entsprechend den Erfahrungen von Herstellern und Anwendern eingengt.

**Tabelle 3** enthält Angaben zu mechanischen Eigenschaften und Wärmebehandlungen. Die meisten Legierungen müssen wärmebehandelt werden. Im Gusszustand enthalten sie Ausscheidungen verschiedener Verbindungen, die sich schädlich auf die Korrosionsbeständigkeit und die mechanischen Eigenschaften, insbesondere die Zähigkeit, auswirken. Diese Ausscheidungen müssen durch Lösungsglühen bei hohen Temperaturen aufgelöst und durch Abschrecken meist in Wasser an der Wiederausscheidung gehindert werden. Die Ausscheidungen bilden sich im Temperaturbereich zwischen etwa 500 und 1100 °C. Diese Bildung von Ausscheidungen wird häufig als Sensibilisierung bezeichnet.

Im **Bild 4** ist die Abhängigkeit der Ausscheidung von der Temperatur und Haltedauer bei verschiedenen Legierungen dargestellt. Das Ziel ist es natürlich, die Zusammensetzung so einzustellen, dass die Ausscheidung erst nach langer Zeit und in einem möglichst engen Temperaturbereich beginnt. Dies ist in besonderem Maße für die Schweißneigung von Bedeutung, da Bauteile aus einer genügend stabilen Legierung nach dem Schweißen nicht mehr wärmebehandelt werden müssen. Auch die Gießeigenschaften

sind deutlich besser, da die geringere Ausscheidungsneigung während der Abkühlung in der Form die Versprödung und damit die Gefahr von Kaltrissen und Brüchen beim Handling der Gussteile herabsetzt. Das Diagramm zeigt sehr deutlich, welche metallurgischen Fortschritte bei der Entwicklung der Ni-Cr-Mo-Legierungen gemacht wurden. „Hastelloy C-276“ ist eine Knetlegierung ähnlich „Hastelloy C“, entspricht also etwa der ersten vor rund 80 Jahren entwickelten Generation.

Bei der Legierungsentwicklung muss man allerdings einen Kompromiss finden zwischen der Forderung nach thermischer Stabilität und Korrosionsbeständigkeit, da gerade die für die Korrosionsbeständigkeit wichtigen Elemente Chrom, Molybdän und Wolfram die Ausscheidungsneigung verstärken. Das Einhalten sehr enger Bereiche und die Überwachung von Kohlenstoff, Begleit- und Spurenelementen hat daher große Bedeutung.



**Bild 4:** Zeit-Temperatur-Ausscheidungs-Diagramm einiger Ni-Cr-Mo-Legierungen [1]; Prüfung nach ASTM G-28 A.

(Es sei angemerkt, dass Zeit-Temperatur-Ausscheidungs- und Zeit-Temperatur-Sensibilisierungs-Diagramme nicht identisch sind, da die Sensibilisierung nach verschiedenen Korrosions-Prüfverfahren, die Ausscheidung dagegen metallographisch ermittelt wird, und nicht jede Ausscheidung auch zu verstärktem Korrosionsangriff führt.)

**Tabelle 2: Chemische Zusammensetzung der Nickelbasislegierungen nach ASTM A494 und anderen Quellen**

Typ	Bezeichnung nach ASTM A494	UNS-Nr.	Chemische Zusammensetzung, Bereiche oder maximale Gehalte an [Masse-%]														
			C	Si	Mn	S	P	Ni	Cr	Mo	Nb	Cu	W	V	Fe	Bi	Sn
Ni	CZ100	N02100	1,0	2,0	1,5	0,03	0,03	>95							1,0		
	(G-Ni93C) <sup>1)</sup>		1,-2,5	2,0	1,5	0,01	>93							1,0			
NiSi	(G-Ni90Si)		1,0	5,5-6,5	1,5	0,01	>90							1,0			
			0,12	8-10	1,5	0,03	Rest	1,0						2-4,0			
NiCu	M35-1	N24135	0,35	1,25	1,5	0,03	Rest			0,5				3,5			
	M35-2	N04020	0,35	2	1,5	0,03	Rest		0,5	26-33,0				3,5			
	M30H	N24030	0,3	2,7-3,7	1,5	0,03	Rest			26-33,0				3,5			
	M25S	N24025	0,25	3,5-4,5	1,5	0,03	Rest			27-33,0				3,5			
NiCrFe	M30C	N24130	0,3	1,0-2,0	1,5	0,03	Rest		1-3,0	26-33,0				3,5			
	CY40	N06040	0,4	3,0	1,5	0,03	Rest	14-17,0	0,6-1,2	1,5-3,5				11,0			
FeNiCr	CU5MCuC		0,05	1,0	1,0	0,03	Rest	19,5-23,5	2,5-3,5					Rest			
	(Alloy 31) <sup>2)</sup>		0,015	0,3	2,0	0,010	0,02	30-32	6,0-7,0	1,0-1,4				Rest			
NiCrMo	CW12MW	N30002	0,12	1,0	1,0	0,03	0,04	Rest	15,5-17,5	16,0-18,0			0,2-0,4	4,5-7,5			
	CW6M	N30107	0,07	1,0	1,0	0,03	0,04	Rest	17,0-20,0	17,0-20,0			0,2-0,4	3,0			
	CW2M	N26455	0,02	0,8	1,0	0,03	0,03	Rest	15,0-17,5	15,0-17,5			0,3-5	2,0			
	CX2MW	N26022	0,02	0,8	1,0	0,03	0,03	Rest	20,0-22,5	12,5-14,5			0,3-5	2,0-6,0			
	CX2M	N26059	0,02	0,5	1,0	0,03	0,02	Rest	22,0-24,0	15,0-16,5			0,35	1,5			
	CW6MC	N26625	0,06	1,0	1,0	0,015	0,015	Rest	20,0-23,0	8,0-10,0			0,35	5,0			
	(C21 C) <sup>3)</sup>	N06210	0,015	0,3	0,5	0,02	0,04	Rest	18,0-20,0	18,0-20,0			0,35	1,0			
(G30C) <sup>4)</sup>	N06030	0,03	0,8	1,5	0,02	0,04	Rest	28-31,5	4-6	1-2,4			13-17				
Ni-Mo	(C2000C) <sup>4)</sup>		0,02					Rest	16 <sup>5)</sup>					3 <sup>1)</sup>			
	N12MV	N30012	0,12	1,0	1,0	0,03	0,04	Rest	1,0	26,0-30,0			0,2-0,6	4,0-6,0			
	N7M	N30007	0,07	1,0	1,0	0,03	0,04	Rest	1,0	30,0-33,0				3,0			
NiSnBi	N3M		0,03	1,0	1,0	0,03	0,04	Rest	1,0	30,0-33,0				3,0			
	CY5SnBiM	N26055	0,05	0,5	1,5	0,03	0,03	Rest	11,0-14,0	2,0-3,5				2,0	3,0-5,0	3,0-5,0	

<sup>1)</sup> DIN 17 730 ((1971)), <sup>2)</sup> Schmidt + Clemens, <sup>3)</sup> Otto Junker,

<sup>4)</sup> Haynes Alloys International

<sup>5)</sup> Mittelwert

Tabelle 3: Mechanische Eigenschaften und Wärmebehandlungen von Nickelbasislegierungen

Typ	Bezeichnung nach ASTM A494	Handelsname	Zugfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	0,2%-Dehngrenze [N/mm <sup>2</sup> ]	Dehnung [%]	Wärmebehandlung
Ni	CZ-100		345	145	10	keine
NiSi		Hastelloy D <sup>1)</sup>	790	790	1	970 - 1000 °C / Ofen
NiCu	M35-1	Monel <sup>2)</sup>	450	170	25	keine
	M35-2	Monel <sup>2)</sup>	450	205	25	keine
	M30H	Monel <sup>2)</sup>	670	415	10	keine
	M25S	Monel S <sup>2)</sup>	300			keine für Class 1, Class 2 & 3 Lösungsglühen, Aushärten
	M30C	Monel <sup>2)</sup>	450	225	25	keine
NiCrFe	CY40	Inconel 600 <sup>2)</sup>	485	195	30	keine für Class 1, Class 2 : 1040 °C min. / Wasser
	CU5MCuC	Incoloy 825CP <sup>2)</sup>	520	240	20	1150 °C / Wasser, 940-990 °C / schnelle Abkühlung
		Alloy 31 <sup>3) 4)</sup>	650	285	40	1180-1240 °C / Wasser
NiCrMo	CW12MW	Hastelloy C <sup>1)</sup>	495	275	4	1175 °C / Wasser oder schnelle Abkühlung
	CW2M	Hastelloy C4 <sup>1)</sup>	495	275	20	1150 °C / Wasser oder schnelle Abkühlung
	CW6M	Hastelloy C22 <sup>1)</sup>	485	275	25	1175 °C / Wasser oder schnelle Abkühlung
	CX2MW	Alloy 59 <sup>3) 4)</sup>	550	280	30	1205 °C / Wasser oder schnelle Abkühlung
	CX2M	Inconel 625	450 - 650	285	35	1180-1250 °C / Wasser
	CW6MC	MAT 21, C21C <sup>5) 6)</sup>	485	275	25	1175 °C / Wasser oder schnelle Abkühlung
	CW6M		500	250	30	Lösungsglühen / Abschrecken
		485	275	25	1175 °C / Wasser oder schnelle Abkühlung	
Ni-Mo	N12MV	Hastelloy B <sup>1)</sup>	525	275	6	1095 °C / Wasser oder schnelle Abkühlung
	N7M, N3M	Hastelloy B2 <sup>1)</sup>	525	275	20	1095 °C / Wasser oder schnelle Abkühlung
NiSnBi	CY5SnBiM	Waukesha 88 <sup>3)</sup>				keine

Markennamen von <sup>1</sup> INCO Alloys, <sup>2</sup> Haynes Alloys International, <sup>3</sup> Waukesha Corp,

## 4 Anwendung der verschiedenen Legierungen

Die Auswahl einer geeigneten Legierung ist nicht einfach. Die summarische Beschreibung der Anwendungsbereiche wie in **Tabelle 1** oder in Werkstoffprospekten der Hersteller kann nur einen ersten Anhaltspunkt dafür geben, welche Legierungsgruppe überhaupt infrage kommt. Einige weitergehende Anhaltsangaben für Knetwerkstoffe enthält die Veröffentlichung [2].

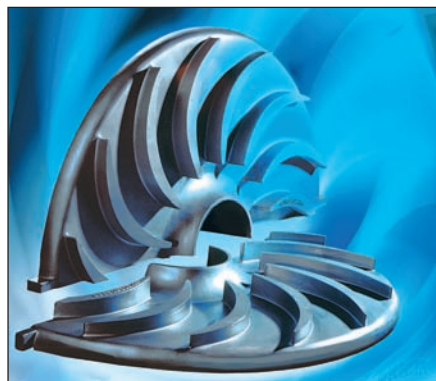
Für die eigentliche Auswahl ist man hingegen auf Beständigkeitstabellen, Erfahrungen, Beispiele ähnlicher Anlagen und letztlich auf Versuche angewiesen. Die Korrosionsbeständigkeit ist ja keine Werkstoffeigenschaft an sich, sondern hängt vom Werkstoff, dem korrosiven Medium mit allen Beimengungen und Verunreinigungen, seiner Temperatur und einer Vielzahl von Randbedingungen wie zum Beispiel Strömung, Belüftung, Bildung von Deckschichten oder Biofilmen, kontinuierlichem oder intermediären Betrieb usw. ab. Schließlich spielen auch wirtschaftliche Gesichtspunkte, Beschaffung und Terminplanung sowie Belange des Umwelt- und Arbeitsschutzes eine Rolle. Viele dieser Faktoren können in der Lebenszyklus-Kostenrechnung (Life Cycle Costing) erfasst werden.

### 4.1 Rein-Nickel

Rein-Nickel (CZ100, G-Ni 95) ist gegenüber Laugen in allen Konzentrationsbereichen und bis zu sehr hohen Temperaturen sehr gut beständig. Im Appa-

ratebau wird es hauptsächlich aus diesem Grund eingesetzt. Es ist weiterhin in neutralen und alkalischen Salzlösungen auch bei hohen Konzentrationen und Temperaturen gut beständig. Ein weiterer Grund für die Verwendung ist, dass Nickel anders als zum Beispiel Eisen oder Kupfer bestimmte Produkte nicht durch Zersetzung, Farbänderung oder Änderung der physikalischen Eigenschaften beeinträchtigt.

Gussteile aus CZ100 werden im Gusszustand eingesetzt. Üblicherweise wird keine Wärmebehandlung vorgenommen. Meist werden mit 0,8 % C, 1,3 % Si und 0,5 % Mn niedrigere Gehalte an Begleit- und Legierungselementen als in den Normen angegeben angestrebt, um Versprödungen zu vermeiden. Durch Zusatz von Magnesium wird der Graphit als Kugelgraphit ausgeschieden. Zum Schweißen werden Nickelelektroden benutzt. Dabei muss auf größte Reinheit geachtet werden, da geringe Gehalte von Blei, Zinn, Wismut und Schwefel den Werkstoff verspröden.



**Bild 5: Geteiltes Laufrad aus Monell 400, Gewicht: 290 kg (Bild: Edelstahlwerke Schmees, Langenfeld/Pirna)**

Die sprödere Sorte G-Ni 90Si nach **DIN 17730** mit 6 % Si hat eine erhöhte Verschleißbeständigkeit.

Eine als „Hastelloy D“ bekannte Sorte mit rund 9 % Si zeichnet sich durch sehr gute Beständigkeit gegen heiße konzentrierte Schwefelsäure aus. Sie ist allerdings recht spröde, hart und schlecht bearbeitbar. Das Hauptanwendungsgebiet sind Armaturenteile, insbesondere Kugeln.

### 4.2 Nickel-Kupfer-Gusslegierungen

Die häufigsten Ni-Cu-Gusslegierungen („Monel“) sind M35-1 und M35-2, die der Sorte GNiCu30Nb entsprechen. Sie haben eine ausgezeichnete Kombination von Festigkeit und Zähigkeit in Verbindung mit guter Beständigkeit gegenüber organischen und anorganischen Säuren, Salzlösungen, Säuren in Lebensmitteln, starken Alkalien und schnell strömendem Meer- und Brackwasser. Sie besitzen zudem gute Duktilität und Wärmeleitfähigkeit. Zu den Einsatzfeldern gehören der Schiffsmaschinenbau, Verarbeitungsanlagen in der chemischen und petrochemischen Industrie, Wärmetauscher, Ventile und Pumpen. Ein Anwendungsschwerpunkt sind heute Gussteile, die gegen Meer- und Brackwasser beständig sein müssen. Hier wird besonders ihre Beständigkeit gegen Spannungsrisskorrosion geschätzt. Alle diese Sorten sind schweißgeeignet. Beim Schweißen muss man sorgfältig darauf achten, dass keine Verunreinigungen eingeschleppt werden.

Kohlenstoff und Silicium erhöhen die Festigkeit. Da der Kohlenstoff nicht als Graphit ausgeschieden werden darf, muss sein Gehalt mit dem Siliciumgehalt

abgestimmt werden. Ab etwa 1,5 % Si wird die Schweißseignung geringer. Der geringe Eisengehalt ist in vielen Korrosionsfällen günstig.

Die höher Niob legierte Variante M-30C hat eine erhöhte Festigkeit bei nur wenig verringerter Zähigkeit, die Schweißseignung ist besonders gut.

Die beiden Sorten M-30H (GNiCu30Si3) und vor allem M-25S (GNiCu30Si4) mit 3 beziehungsweise 4 % Si sind Werkstoffe mit erhöhter Erosions- und Abrasionsbeständigkeit. Sie haben aber nur eine geringe Dehnung. Diese Silicium legierten Sorten werden auch wegen ihrer Widerstandsfähigkeit gegen Fressen und Verschleiß verwendet. Sie sind nicht mehr schweißgeeignet.

Gussteile aus Ni-Cu-Legierungen werden in der Regel im Gusszustand eingesetzt. Solche mit stark unterschiedlichen Wanddicken werden manchmal bei 900 °C lösungsgeglüht. M-30H und M-25S können weichgeglüht oder ausgehärtet werden.

### 4.3 Nickel-Chrom-Eisen-Gusslegierungen

Die Nickel-Chrom-Eisen-Legierungen haben relativ hohe Eisengehalte, so dass sie kostengünstiger unter Verwendung von Ferrolegierungen statt mit Reinelementen erzeugt werden können.

Die Ni-Cr-Fe-Gusslegierung CY40 („Inconel 600“, GNiCr16Fe) darf als Gusswerkstoff bis 0,4 % C, 1,5 % Si und 1,5 % Mn enthalten, wird aber aus Qualitätsgründen meist mit maximal 0,2 % C, 1,5 % Si, 1,0 % Mn, 15,5 % Cr und 8,0 % Fe hergestellt. Trotz der im Vergleich zur Schmiedeversion höheren Gehalte an Begleit- und Legierungselementen werden die Zähigkeitseigenschaften kaum vermindert. CY40 wird üblicherweise im Gusszustand eingesetzt, manchmal allerdings zur Sicherheit lösungsgeglüht



**Bild 6:** Kegel für Regelventile verschiedener Größen, die je nach Beanspruchung aus austenitischem Stahlguss oder Nickel-Basislegierungen gefertigt werden (Bild: Otto Junker, Simmerath)



**Bild 7:** Feingegossene Lüfterschaukeln aus NiCr23Mo16Cu (W.-Nr. 2.4675) (Bild: Schmidt & Clemens, Lindlar)

und abgeschreckt. Zum Schweißen dienen für alle Schweißverfahren artgleiche, auch für die Knetversion gebräuchliche Zusatzwerkstoffe. Eine Wärmenachbehandlung ist nicht erforderlich, da die Wärmeeinflusszone nicht sensibilisiert wird. Wegen der guten Beständigkeit gegen interkristalline Korrosion und Spannungsrissskorrosion wird CY-40 häufig bei Teilen verwendet, die in heißen korrosiven Medien zum Einsatz kommen, in denen hoch legierte Stahlgussarten nicht mehr beständig sind.

Auch CU5MCuC (GNiCr21FeMo) liegt an der Grenze zu den Stählen. Der Gusswerkstoff wurde von einem ähnlichen erfolgreichen Knetwerkstoff „Inconel 825“ abgeleitet. Der Werkstoff ist ein vielseitiger Konstruktionswerkstoff mit Beständigkeit in Säuren und Alkalien sowohl unter oxidierenden als auch reduzierenden Korrosionsbedingungen. Der hohe Nickelgehalt macht die Legierung praktisch unempfindlich gegenüber Spannungsrissskorrosion. Die Beständigkeit gegen Loch- und Spaltkorrosion ist zufriedenstellend. Die thermische Beständigkeit gegen Sensibilisierung ist gut und erlaubt bei sachgemäßer Ausführung die meisten Fertigungs- und Konstruktions-schweißarbeiten ohne nachträgliche Wärmebehandlung. Die Legierung hat gute mechanische Eigenschaften sowohl bei Raum- als auch bei erhöhten Temperaturen bis etwa 550 °C. Sie hat daher sowohl als Knetwerkstoff als auch damit zusammenhängend als Gusswerkstoff zahlreiche Anwendungen im Chemieanlagenbau, im Offshore-Bereich und bei der Lebensmittel-Verarbeitungsindustrie gefunden.

„Alloy 31“ wurde von der Knetlegierung „VDM Nicrofer 3127“ abgeleitet [3]. Ihr Eisengehalt ist etwa ebenso hoch wie der Nickelgehalt, so dass sie zwischen Edelstählen und Nickel-Basislegierungen liegt. Der Stickstoffgehalt, der für viele moderne

Edelstähle typisch ist, erhöht ihre Korrosionsbeständigkeit. Die Legierung ist in basischen und sauren halogenidhaltigen Medien, Schwefelsäure, Phosphorsäure und Chlordioxidlösungen in der Zelluloseindustrie beständig. Die Neigung zur Sensibilisierung und zur Bildung von Ausscheidungen beim Schweißen ist gering, so dass keine Wärmenachbehandlung erforderlich ist.

### 4.4 Nickel-Chrom-Molybdän-Gusslegierungen

Der hohe Gehalt an Molybdän und unter Umständen auch Wolfram in den Nickel-Chrom-Molybdän-Legierungen verbessert entscheidend die Beständigkeit gegen halogenid-induzierte Lokalkorrosion, also Lochfraß und Spaltkorrosion. Die erste Legierung dieser Art, „Hastelloy C“, wurde Anfang der dreißiger Jahre des vorigen Jahrhunderts entwickelt. Die gegossenen Ni-Cr-Mo-Legierungen leiten sich von „Hastelloy C“ sowie „Inconel 625“ ab. Die Sorten CW12MW (GNiMo16-CrW, W.-Nr. 2.4883), CW2M („Hastelloy C-4C“, ähnlich dem GNiMo17Cr, W.-Nr. 2.4686) sowie CX2MW („Hastelloy C-22“, entsprechend dem NiCr21Mo14 W, W.-Nr. 2.4602 für die Knetversion) sind Weiterentwicklungen von „Hastelloy C“. Zur gleichen Gruppe gehört auch „Hastelloy C-276“ (NiMo16Cr15W, W.-Nr. 2.4819 für die Knetversion) mit einem zugunsten des Molybdäns verminderten Chromgehalt, das aber extrem anfällig für eine Sensibilisierung ist (siehe **Bild 1**).

Das Hauptproblem dieser Legierungen besteht darin, dass, wenn die Löslichkeit von Chrom, Molybdän, Silicium, Wolfram oder Vanadium im Nickelmischkristall überschritten wird, intermetallische Verbindungen ausgeschieden werden, die Zähigkeit und Korrosionsbeständigkeit verschlechtern. Bereits beim Lösungs-glühen und Wasserabschrecken, das erforderlich ist, um hohe Korrosionsbeständigkeit zu gewährleisten, können die Guss-



**Bild 8:** Mischschaufel aus GNiMo17 Cr (Hastelloy C-4, W.-Nr. 2.4686) (Bild: Edelstahlwerke Schmees, Langenfeld/Pirna)

teile reißen. Ein Einengen der chemischen Zusammensetzung, Verzicht auf Vanadium, Senken des Wolframgehalts und vor allem ein Vermindern des Kohlenstoffgehalts auf 0,02 % führen zu deutlich zäheren Werkstoffen.

Gussteile aus Ni-Cr-Mo-Legierungen werden stets lösungsgeglüht und in Wasser abgeschreckt. Die Lösungsglühtemperaturen liegen heute meist höher als von der **ASTM A494** gefordert und in **Tabelle 3** angegeben. Eine Temperatur von etwa 1250 °C. sollte allerdings nicht überschritten werden, da es bei höheren Temperaturen bereits zu Anschmelzungen auf den Korngrenzen kommen kann.

Der vergleichsweise niedrige Chromgehalt von CW12MW und CW2M begrenzt ihre Beständigkeit auf oxidierende saure Medien. Außerdem vermindert der niedrige Wolframgehalt von CW2M seine Beständigkeit gegen Loch- und Spaltkorrosion.

Ein Optimieren des gegen oxidierende Medien wirksamen Chromgehalts in Abstimmung mit den in reduzierender Umgebung günstigen Molybdän- und Wolframgehalten führte zur Sorte CX2MW, die eine gute Beständigkeit sowohl unter oxidierenden als auch reduzierenden Bedingungen hat.

Die optimierten Nickel-Chrom-Molybdän-Legierungen zeichnen sich durch hervorragende Beständigkeit auch bei erhöhten Temperaturen in oxidierenden und reduzierenden Medien wie zum Beispiel Schwefelsäure, Phosphorsäure, Salpetersäure, Chlorgas, Säuregemische aus Schwefelsäure und oxidierenden Säuren mit Chloridionen aus. Besonderes Merkmal dieser Legierungen ist ihre hohe Beständigkeit gegen Spalt-, Loch- und Spannungsrisskorrosion bei erhöhten Temperaturen unter oxidierenden und reduzierenden Bedingungen. Alle diese Legierungen sind vor allem bei einem Kohlenstoffgehalt < 0,03 % gut schweißbar.

Zur gleichen Gruppe gehört CW-6MC („Inconel 625“, NiCr22Mo9Nb, W-Nr. 2.4856 für die Knetversion). „Inconel 625“ enthält einen Niobzusatz, der in Verbindung mit

dem Molybdän die Matrix verfestigt und dadurch eine hohe Festigkeit ohne verfestigende Wärmebehandlung gewährleistet. Es findet Verwendung in der chemischen Verfahrenstechnik und in Umweltschutzanlagen. Ein wichtiger Vorteil dieser Legierung besteht darin, dass eine Sensibilisierung erst nach Glühzeiten von rund 100 Stunden eintritt (**siehe Bild 1**). Fertigungs- und Konstruktionsschweißungen sind daher ohne Probleme möglich. Diese Legierung wird auch häufig als Schweißzusatzwerkstoff für hoch legierte Edeltähle verwendet.

„Junkeralloy C21C“ („MAT 21“) ist eine neu entwickelte Legierung, bei der durch einen Tantalzusatz die Beständigkeit gegen Lochfraß und Spaltkorrosion allgemein und besonders im Bereich der Schweißnaht gesteigert wird. Tantal soll die Passivierung verstärken und den Passivfilm stabiler machen.

Die beiden letzten Legierungen in der Gruppe der Ni-Cr-Mo-Gusslegierungen sind eigentlich Knetlegierungen, die auf Wunsch der Kunden gelegentlich auch als Gussteil geliefert werden. „Hastelloy G 30C“ (GNiCr30FeMo, W-Nr. 2.4603) hat besonders in oxidierenden Medien gute Beständigkeit und wird in der chemischen Verfahrenstechnik vor allem bei der Herstellung und Verarbeitung von Salpeter- und Phosphorsäure verwendet. „Hastelloy C-2000C“ ist eine kupferhaltige Variante mit besonders hoher Beständigkeit in heißen konzentrierten Schwefelsäuren und gegen Lochfraßkorrosion. Sie hat eine sehr gute thermische Gefügestabilität.

Der Zusammensetzungsbereich der Ni-Cr-Mo-Legierungen bietet zahlreiche Möglichkeiten, durch Feinabstimmung der Zusammensetzung optimale Eigenschaftsprofile herauszuarbeiten, die für bestimmte Anwendungsfälle von Bedeutung sind. Gerade die Umwelttechnik stellt immer neue Herausforderungen. Ein Beispiel sind Schaufeln für Rauchgas-Entschwefelungsanlagen, die die Abgase von Kraftwerken reinigen müssen, in denen neben Kohle unterschiedlicher Herkunft auch Abfälle und Müll verbrannt werden,

also besonders aggressive Rauchgase entstehen. Auf der Basis der Legierung CX2M wurde durch Einengung der Zusammensetzung eine Variante „Nicroto“ [4] entwickelt, die sich bei extrem niedrigen Kohlenstoff- und geringen Silicium- und Mangangehalten durch eine besonders hohe Beständigkeit unter derartigen Bedingungen auszeichnet.

#### 4.5 Nickel-Molybdän-Gusslegierungen

Die Nickel-Molybdän-Legierungen wurden vor allem zum Einsatz in Salzsäure entwickelt und sind hier den anderen Nickel-Legierungen überlegen. Wie bei anderen Legierungen werden neben den Knetvarianten auch Gussteile erzeugt. Es gibt drei Sorten, die N12MV („Hastelloy B“, NiMo30, W-Nr. 2.4810 für die Knetversion) und N7M sowie N3M („Hastelloy B2“, GNiMo28), wobei die letztgenannte eine Weiterentwicklung der ursprünglichen Legierung „Hastelloy B“ mit verbesserten Verarbeitungseigenschaften ist.

Die N7M und N3M mit abgesenktem Kohlenstoffgehalt, ohne Vanadium und mit genau kontrolliertem Gehalt an Begleit- und Spurenelementen werden für schwere und komplexe Gussteile empfohlen. Sie werden oberhalb 1 200 °C lösungsgeglüht und können mit artgleichen Elektroden geschweißt werden.

#### 4.6 CY5SnBiM

Die zinn- und wismuthaltige Legierung CY5SnBiM ist die einzige austenitische korrosionsbeständige Legierung, die mit gutem Erfolg in Verschleißpaarungen mit rostfreiem Stahl eingesetzt werden kann. Die Legierung wird gewöhnlich unter Lizenz hergestellt und ist sehr schwierig zu erzeugen. Weiterhin kann der Werkstoff nicht geschweißt werden. Ihre Zusammensetzung mit relativ hohen Gehalten von Wismut und Zinn stellt als Kreislauf eine erhebliche Gefährdung für alle anderen in der Gießerei hergestellten Legierungen dar. Eine Vermischung mit anderen Werkstoffen muss daher auf jeden Fall vermieden werden.



**Bild 9:** Mischschaufel aus GNiMo17Cr (Hastelloy C-4, W.-Nr. 2.4686) (Bild: Edelstahlwerke Schmees, Langenfeld/Pirna) (links)

**Bild 10:** Schaufel aus Inconel, 10 g schweres Feingussteil, Abmessungen 35 x 25 x 7 mm (Bild: NRU, Neukirchen)(Mitte)

**Bild 11:** Kühlelement für Gasturbine aus NiCrMo-Legierung (W. Nr. 2.4665) im keramischen Genaugießverfahren EXACAST gefertigt (Bild: Wolfensberger, Bauma (CH)) (rechts)

## 5 Herstellung, Verarbeitung und Wärmebehandlung

Nickel-Basislegierungen sind Hochleistungswerkstoffe, die auch bei der Erzeugung hohe Anforderungen stellen [5]. Der Schmelz- und Gießereibetrieb muss entsprechend eingerichtet sein und Erfahrungen bei der Herstellung derartiger Legierungen besitzen. Ein Grundproblem aller Nickel-Basislegierungen ist ihre hohe Neigung zur Gasaufnahme insbesondere von Wasserstoff, aber auch Sauerstoff oder Stickstoff. Beim Schmelzen und Gießen muss also dafür gesorgt werden, dass eine Gasaufnahme vermieden beziehungsweise eingebrachtes Gas wieder entfernt wird.

Ein zweites Problem sind die Einsatzstoffe. Nickel-Basislegierungen sind gegen viele Begleitelemente wie Schwefel, Phosphor, Blei, Zinn, Wismut usw. sehr empfindlich. Solche Verunreinigungen lagern sich in den Korngrenzen an und führen zu Warmrissen, Versprödungserscheinungen, Rissen beim Schweißen und unter Umständen auch zu Korrosionsangriffen auf den Korngrenzen. Derartige Verunreinigungen können die Herstellung komplexer Gussteile einfach unmöglich machen, da diese bereits in der Form reißen und beim Versuch, sie durch Schweißen zu reparieren, erneut Heißrisse entwickeln. Schrott von Knetlegierungen kann nur mit großer Vorsicht oder gar nicht als Kreislaufmaterial verwendet werden, da die Knetlegierungen häufig Titan oder Aluminium enthalten, die bei den Gusslegierungen zu erheblichen Problemen führen.

Die in den Normen angegebenen zulässigen Zusammensetzungsbereiche sind recht breit und müssen unter Berücksichtigung der Einsatzbedingungen und der Art des Gussteils eingengt werden. Hierzu ist erhebliche Erfahrung erforderlich.

Die Gießeigenschaften sind im Prinzip ähnlich wie bei hoch legierten Edelmetallen, unterscheiden sich aber von Legierung zu Legierung teilweise ganz erheblich. Auch bei einer nominell gleichen Legierung können kleine Änderungen in der chemischen Zusammensetzung, zum Beispiel beim Siliciumgehalt, die Gießeigenschaften deutlich verändern. Ähnliches gilt für das Speisungsverhalten. Bei den Formstoffen sollten anorganische Binder wie Wasserglas-CO<sub>2</sub> oder rein keramische Formstoffe wie beim Feingießen bevorzugt werden. In vielen Gießereien werden organisch gebundene Sande wegen ihrer bekannten Vorteile verwendet. Organische Bindersysteme können erfolgreich eingesetzt werden, bringen aber das Risiko einer Kohlenstoff-

oder Gasaufnahme mit sich. Besonders riskant sind regenerierte oder recycelte Sande wegen ihrer Reststoffe. Eine Kohlenstoffaufnahme an nicht bearbeiteten, Medium beaufschlagten Oberflächen des Gussteils kann sich sehr schädlich auf die Korrosionsbeständigkeit auswirken. Die Tiefe der Aufkohlungsschicht kann bis zu 2 mm betragen, und der Kohlenstoff kann während der Hochtemperaturwärmebehandlung noch tiefer in das Material eindringen. Bei besonders hohen Anforderungen kann man die aufgekohlte Randschicht abschleifen.

Für das Dichtspeisen und Bemessen des Speiser- und Anschnittsystems gelten ähnliche Gesichtspunkte wie bei austenitischen Edelmetallen. Um die geforderten mechanischen Eigenschaften und vor allem eine hohe und sichere Korrosionsbeständigkeit zu erreichen, müssen die Gussteile dicht und porenfrei sein. Eine Erstarrungssimulation ist sicher hilfreich, vorausgesetzt, die erforderlichen thermophysikalischen Daten stehen zur Verfügung oder können von hoch legierten Stählen übernommen werden.

Fast alle Gussteile aus Nickel-Basislegierungen müssen wärmebehandelt werden. Anhaltswerte dafür enthält **Tabelle 3**. Die Wärmebehandlung bei Temperaturen über 1 100 und teilweise über 1 200 °C ist erforderlich, um die im Gusszustand ausgeschiedenen intermetallischen Phasen und Carbide aufzulösen und eine gewisse Homogenisierung der Legierungsverteilung zu erreichen. Es ist wichtig, dass die Gussteile vor und während der Wärmebehandlung sauber und frei von jeglichen Verunreinigungen sind.

Schwefel, Phosphor, Blei und andere niedrig schmelzende Metalle können bei der Wärmebehandlung zur Schädigung führen. Derartige Verunreinigungen sind auch in Markierungs- und Temperaturanzeige-Farben oder -Stiften sowie in Schmierfetten, Ölen, Brennstoffen und dergleichen enthalten. Elektroöfen sind wegen der genauen Temperaturführung und Freiheit von Verunreinigungen empfehlenswert. Gasbeheizte Öfen sind verwendbar, sofern die Verunreinigungen niedrig gehalten werden. Die Brennstoffe müssen einen möglichst niedrigen Schwefelgehalt aufweisen. Erdgas sollte weniger als 0,1 Gew.-% Schwefel enthalten, Heizöl maximal 0,5 Gew.-% S. Die Ofenatmosphäre soll neutral bis leicht oxidierend eingestellt werden und darf nicht zwischen oxidierend und reduzierend wechseln. Die Gussteile dürfen nicht direkt von den Flammen beaufschlagt werden. Temperaturen über 1250 °C sind zu vermeiden, da es dann zu Anschmelzerscheinungen auf den Korngrenzen kommen kann, die die mechanischen Eigenschaften drastisch verschlechtern. Nach dem Lösungs-



**Bild 12:** Laufrad aus GNiMo17Cr (Hastelloy C-4, W.-Nr. 2.4686) (Bild: Edelstahlwerke Schmees, Langenfeld/Pirna)

glühen werden die Gussteile möglichst rasch, in der Regel in Wasser, abgeschreckt. Dieses Abschrecken ist eine erste Qualitätsprüfung, da viele fehlerhafte Teile bei dieser Gelegenheit reißen.

## 6 Schweißen

Alle Nickel-Basisgusslegierungen aus **Tabelle 1**, ausgenommen die drei verschleiß- oder fressbeständigen Legierungen M-30H, M-25S und CY5SnBiM, werden als schweißgeeignet bezeichnet. Diese Legierungen sind im Prinzip einphasige austenitische Werkstoffe und daher beim Schweißen sehr anfällig gegen Warmrisse oder Mikrorisse entlang der Korngrenzen. Das Einstellen sehr niedriger Gehalte an Verunreinigungen wie Blei, Zinn, Wismut, Antimon, Schwefel, Phosphor und Bor ist hilfreich, um diese Rissanfälligkeit herabzusetzen. Es ist aber noch nicht völlig klar, welche Verunreinigung oder welche Kombination von Verunreinigungen die eigentliche Ursache ist. Man weiß jedoch, dass die Heißrisseanfälligkeit bei extra reinen Nickel-Basislegierungen nicht mehr auftritt. Diese extrem hohe Reinheit ist jedoch weder wirtschaftlich noch praktisch in einer Gießerei darstellbar. Um das Auftreten von Heißrissen möglichst zu vermeiden, sollen beim Schweißen Wärmeeinbringen und Zwischenlagentemperatur möglichst niedrig gehalten, übermäßige Verspannungen vermieden und alle zu schweißenden Zonen gründlich gereinigt werden. Weitere Hinweise zum Schweißen von Nickel-Basislegierungen enthält [6].

## 7 Vergleich von Knet- und Gusslegierungen

Den gegossenen Nickel-Basislegierungen wird oft nachgesagt, dass sie eine schlechtere Korrosionsbeständigkeit als die entsprechenden Knetwerkstoffe haben. Diese Kritik ist teilweise berechtigt, teilweise aber unsachlich oder unfair. Die Knetlegierungen werden in Form von

Flachprodukten, Stangen, Knüppeln und Rohren von relativ großen Herstellern erzeugt. Die Mengen sind so groß, dass eine sorgfältige und ausgefeilte Qualitätsüberwachung wirtschaftlich möglich und sinnvoll ist. Aus diesem Halbzeug werden dann durch Verformen, Zerspanen und Schweißen Apparate, Anlagekomponenten und Bauteile hergestellt. Die Trennung zwischen der Fertigung des Halbzeugs und der Herstellung der Bauteile erlaubt es, beide Verfahrensstufen zu optimieren. Gussteile werden dagegen quasi in einem Schritt erzeugt, der vom Schmelzen bis zum Ausleeren des Teils reicht. Die Einflussmöglichkeiten sind daher deutlich geringer. Hinzu kommt, dass die Erzeugnismengen kleiner sind und die Produkte zum Teil eine sehr komplexe Form haben, so dass das Vermeiden von Poren, Rissen, Oberflächenfehlern, Verzug und Maßabweichungen ein wesentliches Anliegen darstellt. Die häufigsten Fehler bei Gussteilen sind Poren, Risse sowie durch Oberflächenreaktionen erzeugte Oberflächenfehler. Hinzu kommen auf der langsameren Abkühlungsgeschwindigkeit in der Form beruhende Gefügeinhomogenitäten wie Seigerungen und Ausscheidungen. Die bei den Verformungsvorgängen des Halbzeugs aus Knetwerkstoffen erreichte Kornverfeinerung und Homogenisierung entfällt.

Die Ergebnisse von Korrosionsversuchen an Knetlegierungen und Proben der Gussvariante der gleichen Legierung in **Tabelle 4** zeigen, dass die Beständigkeit des Gusswerkstoffs meist, aber nicht immer geringer ist.

In der Praxis ist natürlich nicht das Verhalten des Werkstoffes an sich, sondern das des Bauteils maßgebend. Komplexe Bauteile wie Ventilkörper, Pumpengehäuse usw. können aus Knetlegierungen nur durch oft umfangreiche Schweißarbeiten aus geschmiedeten Einzelteilen zusammengefügt werden. Die Schweißstellen jedoch sind quasi ebenfalls ge-

gossene Bereiche und können ähnliche Fehler und Probleme wie die Gussteile aufweisen. Ein Ausweg besteht darin, das Teil durch Zerspanen aus einem entsprechend großen geschmiedeten Block herzustellen. Dieser bis vor einigen Jahren meist unwirtschaftliche Weg ist heute dank der modernen computergesteuerten Bearbeitungsmöglichkeiten vor allem bei Einzelstücken eine Alternative. Andererseits lassen sich mit den Möglichkeiten des Rapid Prototyping Einzelstücke und sogar Kleinserien schnell, kostengünstig und mit hoher Qualität erzeugen.

## 8 Beschaffung von Ni-Basis-Gussteilen

Viele Qualitätsprobleme mit Gussteilen aus Nickel-Basislegierungen sind auf die Suche der Abnehmer nach einem möglichst billigen Lieferanten zurückzuführen. Bei Knetlegierungen setzt sich der Preis des Bauteils aus den Kosten des Halbzeugs und seiner Verarbeitung zusammen und ist damit überschaubar und transparent. In der Regel sind die Preisunterschiede beim Halbzeug nicht allzu groß, und es gibt nur eine beschränkte Anzahl von Anbietern. Bei Gussteilen wird ein Endpreis für das Bauteil gefordert, der in starkem Maße von der Kostenstruktur der Gießerei und ihrer Kalkulation abhängt. Einen erheblichen Anteil machen die von Land zu Land unterschiedlichen Lohn-, Umweltschutz- und Energiekosten aus. Die Versuchung für Abnehmer und Verarbeiter, diese Preisunterschiede auszunutzen und die Gussteile beim billigsten Anbieter zu beschaffen, ist daher groß. Ni-Basis-Gussteile sind aber nicht vergleichbar mit solchen aus Gusseisen oder Kohlenstoffstahl. Nicht jede Edelstahlgießerei, die durch die hohen Kilopreise veranlasst wird, auch Nickel-Basislegierungen anzubieten und herzustellen, hat die erforderlichen Erfahrungen, technischen Einrichtungen und Beratungskompetenzen.

Auch die Kommunikationsprobleme und die Mentalitätsunterschiede sollte man nicht unterschätzen. Selbst wenn die Gussteile fehlerfrei sind und die Anforderungen der Norm für chemische Zusammensetzung und Eigenschaften erfüllen, können Sie im Einsatz versagen, da für bestimmte Fälle nur ein enger Bereich aus der Normzusammensetzung geeignet ist.

Der Besteller sollte daher folgende Punkte klären:

1. Hat die Gießerei bereits Referenzen als Hersteller von Nickel-Basislegierungen?
2. Verfügt die Gießerei über Analysengeräte, die für Nickel-Basislegierungen geeicht sind? (Bei Aufträgen aus der petrochemischen Industrie werden Gießereien manchmal aufgefordert, als Teil der Qualifizierung eine Probe zu analysieren.)
3. Verfügt die Gießerei über Hochleistungs-Induktionstiegelöfen, die eine Schmelzgeschwindigkeit von 1 000 kg/h ermöglichen oder Vakuumtechnik so wie andere sekundärmetallurgische Möglichkeiten?
4. Welche Vorkehrungen werden getroffen, um eine Kohlenstoffaufnahme des Gussteils aus der Form und aus dem Kern zu vermeiden?

Eine kompetente Gießerei sollte diese Fragen ohne Probleme zufriedenstellend beantworten können.

### Schrifttum

- [1] Kirchheiner, R., M. Köhler u. U. Heubner: Nicrofer 5923 hMo – ein neuer hoch korrosionsbeständiger Werkstoff für die chemische Industrie, die Umwelttechnik und verwandte Anwendungen. Werkstoffe und Korrosion 43 (1992) S. 388 - 395.
- [2] Heubner, U., u. a.: Kontakt & Studium Bd. 153: Nickelwerkstoffe und hochlegierte Sonderedelstähle. Expert Verlag, 2. Auflage, 1993.
- [3] Werkstoffdatenblatt Märker Alloy 31, Schmidt & Clemens, Lindlar 2005.
- [4] Prospektmaterial der Dörrenberg Edelstahl GmbH.
- [5] Atkinson, R.: Herstellung von Gussstücken aus Nickel-Basislegierungen. Gießerei-Praxis (2000) H. 12, S. 515 - 524.
- [6] Avery, R. E., u. A. H. Tuthill: Guidelines for the welded fabrication of nickel alloys for corrosion-resistant service. Nickel Development Institute, Reference Book Series No. 11 012, 1994.
- [7] Prospektmaterial von Wiggin.
- [8] Smith, J. D., u. P. E. Manning: Hastelloy Alloy C-22. Bericht, Haynes International.

**Tabelle 4: Ergebnisse von Korrosionsversuchen an Nickelbasis-Knet- und Gusslegierungen [7, 8]**

Medium	Temperatur	Gussvariante "Incoloy 825CP"	Knetwerkstoff "Incoloy 825" (Blech)
		Korrosionsgeschwindigkeit [mm/a]	
siedende 5 % HCl		12,75	9,3 – 10,3
siedende konz. H <sub>2</sub> O <sub>4</sub>		1,96	2,2 – 5,8
siedende 5 % H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>		0,54	0,2 – 0,5
siedende 65 % HNO <sub>3</sub>		0,63	0,3
ASTM G28 A		Korrosionsgeschwindigkeit [mpy]	
42 g/l Eisensulfat + 50 % H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , siedend		"Hastelloy C-22", CX2MW: 54	"Hastelloy C-22": 24
		CW2M: 150 - 300	"Hastelloy C-4C": 167
60 % H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , 20 % HCl, 15 % HNO <sub>3</sub> 1 % HF, 1 % FeCl <sub>3</sub>	49 °C	"Hastelloy C-22", CX2MW: 17 - 21	"Hastelloy C-22": 9
	66 °C	41 - 46	n. b.
	49 °C	CW12MW: 191	"Hastelloy C-276": 89
	66 °C	207	325