

Mannesmannröhren-Werke AG
Mannesmann Forschungsinstitut GmbH

Ehinger Straße 200
4100 Duisburg-Huckingen

Werkstoffauswahl und Konzept
für das Bohrgestänge im
Rahmen des kontinentalen
Tiefbohrprogramms der
Bundesrepublik Deutschland

Auf der Grundlage der nach heutigem Stand verfügbaren Angaben über die KTB-Bohrung, wie das Temperaturprofil, die aufgrund oberflächennaher Vorbohrungen zu erwartenden korrosiven Medien, das vorgesehene Spülungs-System sowie die von KTB festgelegten allgemeinen Eckdaten für das Bohrgestänge, wurden acht als aussichtsreich angesehene Werkstoff-Gruppen gebildet und die Auswertung von Veröffentlichungen sowie die Verwendung interner Untersuchungsergebnisse zur Darstellung des Kenntnisstandes auf diese Werkstoff-Gruppen konzentriert.

Die Eigenschaften der Werkstoffe wurden in Eigenschaftsmerkmale gegliedert, die sowohl mechanisch-technologische Eigenschaften umfassen, wie auch Korrosion, Verschleiß sowie die Herstellbarkeit von Rohren und deren Verhalten beim häufigen Wiederverschrauben berücksichtigen.

Diese Werkstoff-Gruppen umfassen hochfeste Stähle und Leichtmetallwerkstoffe, wobei Veröffentlichungen über geplante oder durchgeführte Tiefbohrungen (Mohole, Kola) besondere Beachtung fanden, ebenso wie hochfeste, korrosionsbeständige Werkstoffe im Hinblick auf eine möglichst geringe Kontamination des Bohraustrages durch Korrosionsprodukte.

Für jede Gruppe wurden möglichst mehrere charakteristische Werkstoffe ausgewählt.

I.	Niedriglegierte hochfeste Stähle	36 CrNiMo 4-135* 30 CrNiMo 8-170
II.	Martensitaushärtender Stahl	X 2 NiCoMoTi 18 12 4
III.	Nichtrostende Stähle mit Cr-Gehalten > 13 %	X 20 Cr 13-95 X 4 CrNiMo 16 5 X 3 CrNiMoAl 13 8 2
IV.	Hochlegierte Stähle mit Cr-Gehalten > 20 %	X 2 CrNiMoN 22 5-130 X 1 NiCrMoCu 31 27-130
V.	Nickelbasislegierungen	Hastelloy G 2-130 Hastelloy C 276-190
VI.	Titanlegierungen	Ti 3Al 8V 6Cr 4Zr 4Mo (β-Titan) Ti 6Al 4V (α + β-Titan)

* Werkstoff mit Mindeststreckgrenze 135 ksi (1 ksi = 6,895 N/mm²)

VII. Aluminiumlegierungen	AlCuSiMn AlZnMgCu 1,5
VIII. Magnesiumlegierung	MgZn 6 Zr

Als erstes Eigenschaftsmerkmal wurde das mechanisch-technologische Verhalten insbesondere im Hinblick auf eine zu erwartende Bohrlochtemperatur von etwa 300°C untersucht. Der Abfall der Dehngrenze mit zunehmender Temperatur ist für verschiedene Stähle, Nickel-Basis-Legierungen sowie für Titan- und Aluminiumlegierungen in den Bildern 1 bis 4 dargestellt.

Ein weiteres für die Werkstoffauswahl entscheidendes Merkmal sind die Korrosionseigenschaften im Hinblick auf die Forderung der Geowissenschaften, den Bohraustrag in möglichst originärem, d. h. von Fremdstoffen unbeeinflusstem Zustand zu gewinnen. Am Beispiel unlegierter martensitischer Stähle ist das Korrosionsverhalten in den Bildern 5 und 6 dargestellt.

Kennzeichnend für einen Bohrstrang-Werkstoff ist auch das Dauerfestigkeitsverhalten, insbesondere in Abhängigkeit von der Temperatur. Ein charakteristisches Beispiel ist der Steilabfall bei Al-Legierungen oberhalb 150°C (Bild 7).

Schließlich bilden die wichtigsten physikalischen Eigenschaften der Werkstoffgruppen die erforderliche Berechnungsgrundlage (Tabelle 1) für die Strangauslegung.

Die einzelnen Eigenschaftsmerkmale wurden für jede Werkstoffgruppe untersucht und ausführlich dokumentiert.

Bezüglich der verwendeten Literaturzitate sei auf die KTB-Studie verwiesen. Unter Berücksichtigung der vorgegebenen Anforderungen wurden die Eigenschaftsmerkmale je Werkstoffgruppe qualitativ bewertet und die Ergebnisse getrennt für Rohr- und Verbinder-Werkstoff in Matrixform dargestellt (Tabelle 2). Aus einer Gesamtbeurteilung der bewerteten Eigenschaftsmerkmale einer Werkstoffgruppe wurde die Eignung bzw. Nichteignung einer Werkstoffgruppe als Bohrstrangwerkstoff abgeleitet. Für das Ausscheiden einer Werkstoffgruppe war ausschlaggebend, daß mindestens eine Werkstoffeigenschaft die Verwendung ausschloß.

Für die Auslegung des Bohrstranges wurden zwei Grundkonzepte in Betracht gezogen. Im ersten Fall wurde die Frage untersucht, aus welchem Werkstoff der Bohrstrang durchgängig hergestellt werden könnte. Im zweiten Fall wurden die Werkstoffe danach beurteilt, ob der Gesamtstrang aus 2 oder mehr Teilsträngen mit unterschiedlichen Werkstoffen zusammengesetzt werden kann.

...

Für das Konzept eines Bohrstranges aus einem einheitlichen Bohrrohr-Werkstoff eignen sich folgende Werkstoff-Alternativen:

- Niedriglegierter, hochfester Stahl 30 CrNiMo 8-170 (Drillpipe) und 36 CrNiMo 4-120 (Tooljoint)
- Nickel-Basis-Legierung Hastelloy C276-190 (Drillpipe) und Hastelloy C276-120 (Tooljoint)

Die untersuchten Aluminium- und Magnesiumlegierungen scheiden wegen ihrer nicht ausreichenden Festigkeit bei der vorgegebenen Zugreserve und dem Zirkulationsdruck aus. Titanlegierungen können wegen der sehr großen Kriechneigung oberhalb 200°C nicht eingesetzt werden.

Das Konzept eines aus Teilsträngen unterschiedlicher Werkstoffe kombinierten Bohrstranges ergab, daß mit Titanlegierungen im oberen Bohrlochbereich, d. h. bei einer Temperatur von weniger als 200°C, folgende Alternativen möglich erscheinen:

- Kombination von Teilsträngen aus niedriglegiertem, hochfestem Stahl 30 CrNiMo 8-170 (Drillpipe) und 36 CrNiMo 4-120 (Tooljoint) mit Titanlegierung Ti 6Al 4V-150 (Drillpipe) und Ti 6Al 4V-150 (Tooljoint)
- Kombination von Teilsträngen aus Hastelloy C 276-190 (Drillpipe) und Hastelloy C 276-120 (Tooljoint) mit Titanlegierung Ti 6Al 4V-150 (Drillpipe) und Ti 6Al 4V-150 (Tooljoint)
- Kombination von Teilsträngen aus hochlegiertem Stahl X 1 NiCrMoCu 31 27-130 (Drillpipe) und X 1 NiCrMoCu 31 27-130 (Tooljoint) mit Titanlegierung Ti 6Al 4V-150 (Drillpipe) und Ti 6Al 4V-150 (Tooljoint)

In den folgenden Ausführungen sollen die Besonderheiten, Vorzüge und Einschränkungen der für die beiden Konzepte genannten Werkstoffe erläutert werden, die sich aus der Einzelbewertung der Eigenschaftsmerkmale ergeben.

Alle Werkstoffgruppen sind mit Blick auf die Dauerbeanspruchbarkeit bei Biegewechsel-Bbeanspruchung unter korrosiven Bedingungen durch Schwingungsrißkorrosion gefährdet - insbesondere der niedriglegierte, hochfeste Stahl. Von besonderem Einfluß sind die Sauerstoffkonzentration in der Spülung, weshalb entsprechende Maßnahmen zur Absenkung des Sauerstoffgehaltes vorzusehen sind, und die Lage und Höhe der Bohrlochabweichung. Bei einer Abweichung von mehr als 1°/100 ft im oberen Bohrlochabschnitt sind bei Zugbelastung durch das volle Stranggewicht Dauerbrüche nicht auszuschließen.

...

Mit abnehmender Zuglast, z. B. bei Bohrlochabweichungen in größerer Teufe, ist dieser Einfluß weniger kritisch.

Diese Gefährdung ist keine spezifische Eigenschaft der hier behandelten Stähle, diese liegen unter normalen Bohrbedingungen ebenfalls sicher im Dauerfestigkeitsbereich.

Der Verschleißbeanspruchung an Rohr und Verbinder unterliegen alle Varianten, die bei den Alternativen aus niedriglegiertem Stahl durch die abtragende Korrosion verstärkt wird.

Da Schwingungskorrosion und abtragende Korrosion wesentlich vom Sauerstoffgehalt in der Spülung abhängen, ist eine entsprechende Aufbereitung der Spülung zur Einhaltung möglichst niedriger Sauerstoffkonzentrationen von besonderer Bedeutung. Zur frühzeitigen Erkennung von Anrissen sowie von Wanddickenschwächungen sind deshalb insbesondere mit zunehmender Bohrteufe Inspektionen und zerstörungsfreie Prüfungen besonders für die stärker belasteten Strangabschnitte in kurzen Zeitabständen erforderlich.

Ein von der Werkstoffauswahl unabhängiges Problem ist die Auswahl eines geeigneten Schmierstoffes. Die gebräuchlichen Fette sind auf Mineralölbasis aufgebaut, so daß die Entstehung unerwünschter kurzkettiger Kohlenwasserstoffe durch thermische Zersetzung nicht auszuschließen ist. Die Fette "Geothermal grade lube" und "Esgard" sollen bis 260 bzw. 300°C beständig sein. Die auf Fluorkohlenwasserstoffen aufgebauten Fette "Barrierta" und "Ontropeen" sollen ihre Eigenschaften bis 300°C behalten.

Zur Abschätzung der max. Wärmebelastung ist die Ermittlung des Temperaturprofils für den Bohrstrang unter Berücksichtigung der Kühlwirkung bei umlaufender Spülung erforderlich. Stoffe mit ausreichender Schmierwirkung nach Auslagerung bei der max. Wärmebelastung sind darauf zu untersuchen, ob sie bei den verschiedenen Werkstoff-Varianten unter Anwendung bekannter Oberflächenbehandlungen die erforderliche Wiederverschraub-Häufigkeit gewährleisten.

Im Hinblick auf ihr Korrosionsverhalten unterscheiden sich die Werkstoff-Varianten grundsätzlich insofern, als ein Bohrstrang aus niedriglegiertem Stahl sowie kombinierte Teilstränge aus Titan und niedriglegiertem Stahl Korrosionsprodukte bilden, die die Spülung kontaminieren, während die Varianten aus hochlegierten Stählen und Titan nicht korrodieren. Wenn im Spülungssystem Korrosionsprodukte nicht zugelassen werden können, ist auch die vorgesehene Schutz-Casing-Tour aus niedriglegiertem Stahl in Frage zu stellen.

Im einzelnen ergeben sich noch folgende Hinweise zu den Werkstoff-Alternativen:

1. Hochfester niedriglegierter Stahl

Die konstruktive Auslegung (Design Nr. 111/211, Tabelle 3 und 4; bezüglich der weiteren Design-Nrn. sei auf die KTB-Studie verwiesen) beruht auf innen- und außengestauchten Rohrenden für vorgeschweißte Verbinder mit Rotary-Anschlüssen nach API Spec. 7 unter Annahme unterschiedlicher Sicherheitsbeiwerte. Als Verbinderwerkstoff ist ein gebräuchlicher API-Werkstoff mit 120 ksi Streckgrenze vorgesehen. Das Reibschweißen beider Werkstoffe ist erprobt. Das Verschraubverhalten des Verbinderwerkstoffes ist als unproblematisch bekannt.

Im Hinblick auf die Korrosionsbelastung insbesondere die Spannungsrißkorrosion bei Biegewechselbeanspruchung unter hoher Zugbeanspruchung wurde auf die besondere Bedeutung der Sauerstoffkonzentration in der Spülung bereits hingewiesen.

Für eine Beschwerung der Spülung sollte Na_2CO_3 nicht, als Pufferung nur max. 3 % zugelassen werden. Eine schwere Spülung aus CaCl_2 sollte mit CaO gepuffert werden.

Bohrstränge aus niedriglegiertem Stahl sollten insbesondere nach Einsatz unter hoher Zuglast bereits nach kurzen Verweilzeiten im Bohrloch inspiziert werden, auch bei evtl. Stillstandzeiten ohne dynamische Belastung.

2. Kombinierte Teilstränge aus niedriglegiertem Stahl und Titanlegierung (Ti 6AL 4V)

Die Auslegung eines kombinierten Stranges sieht den Einsatz der Titanlegierung bis zu einer Teufe vor, die im Temperaturprofil der Bohrung unter 200°C entspricht, um eine Gefährdung des Stranges durch den Abfall der Kriechbeständigkeit der Titanlegierung bei höheren Temperaturen zu vermeiden.

Für den Gesamtstrang gelten hinsichtlich der Korrosionsbelastung die gleichen Hinweise wie beim niedriglegierten Stahl. Außerdem gibt es Hinweise in der Literatur auf eine Wasserstoffversprödung der Titanlegierung oberhalb etwa 90°C bei Kontakt mit Stahl. Da diese Hinweise nur in wenigen Literaturstellen erwähnt werden, bedürfen sie der Nachprüfung.

Diese Frage ist nicht nur für die Kombination von Teilsträngen von Bedeutung, sondern ebenso für die Frage, ob Stahl-Verbinder an Titan-Rohre vorgeschweißt werden können, mit dem Ziel, Titanverbinder mit bisher unbekanntem Wiederverschraubverhalten durch Stahlverbinder zu ersetzen.

...

Allerdings liegen nur geringe Kenntnisse über das Reibschweißen von Stahl mit Titanlegierungen vor. Das Reibschweißen von Titan mit Titan ist nach Literaturhinweisen wie auch im eigenen Versuch erfolgreich verlaufen.

Ein weiterer Hinweis gilt der relativ geringen Zähigkeit von Titanlegierungen mit der Gefahr geringer Reserven für rißartiges Versagen. In diesem Zusammenhang erfolgte die Empfehlung eines Herstellers, für die Verwendung als Drillpipe nur die Legierung Ti 6Al 4V vorzusehen.

Schließlich sei erwähnt, daß der Prozeß des Richtens von Titanrohren in dem hier angesprochenen Abmessungsbereich z. Zt. noch nicht fertigungssicher beherrscht wird.

3. Nickel-Basis-Legierung Hastelloy C 276

Die Legierung gehört zur Gruppe der kaltverfestigten Werkstoffe und kann deshalb nicht warm gestaucht werden. Aufgrund der hohen Festigkeit kommt auch eine Kaltstauchung nicht in Betracht. Hieraus leiten sich Besonderheiten hinsichtlich der Fertigung und Konstruktion ab. Die Konstruktion sieht eine deutliche Verdickung der Rohrenden auf etwa 200 % des Rohrquerschnittes vor, um den zu erwartenden Festigkeitsabfall durch die Reibschweiße mit dem Verbinder auszugleichen. Allerdings liegen keine Angaben über den Grad des Festigkeitsabfalles in der wärmebeeinflussten Zone der Reibschweißnaht sowie über Besonderheiten beim Reibschweißen selbst vor.

Die Verdickung der Rohrenden kann durch spanende Bearbeitung des Rohrkörpers mit entsprechend hohem Aufwand erreicht werden. Eine Aufschraub-Verbinder-Konstruktion wurde wegen der hohen Freßneigung des Werkstoffes und der Unsicherheit auch einer einmaligen Verschraubung bei hoher Flächenpressung nicht in Betracht gezogen.

Zum Wiederverschraubverhalten von Tooljoint-Verbindern aus diesem Werkstoff liegen keine Aussagen vor. Aufgrund der Erfahrung mit den anders gestalteten und weniger beanspruchten Tubing-Verbindungen ist eine geeignete Oberflächenbehandlung erforderlich, die unter praxisnahen Bedingungen erprobt werden muß. Wie die Frage des Fressens durch Vorschweißen von niedriglegierten Stahl-Tooljoints zu lösen ist, wäre durch Schweißversuche sowie Festigkeits- und Korrosionsuntersuchungen abzusichern.

Zur Vermeidung der Gefährdung des Stranges durch Spannungsrißkorrosion sollte beim Einsatz einer schweren CaCl_2 -Spülung mit CaO gepuffert werden.

...

Schließlich sollte darauf hingewiesen sein, daß der Strang aus Hastelloy C 276 wegen der hohen Dichte dieses Werkstoffes mit einem Stranggewicht in Spülung von ca. 5 400 kN die Hakenregellast von 5 500 kN nahezu vollständig in Anspruch nimmt.

4. Kombinierte Teilstränge aus Hastelloy C 276 und Titanlegierung (Ti 6AL 4V)

Hinsichtlich der Korrosionsbelastbarkeit ist der kombinierte Strang demjenigen aus Hastelloy gleichwertig. Durch die Kombination wird das Stranggewicht um ca. 28 % vermindert und liegt deutlich unterhalb der Hakenregellast.

Für den kombinierten Strang gelten die gleichen Hinweise hinsichtlich Reibschweißverhalten und Wiederverschraubbarkeit sowie Zähigkeit und Fertigungssicherheit, wie sie für diese Werkstoffe im einzelnen bereits beschrieben wurden.

Bei der Kombination Hastelloy C 276 und Ti 6AL 4V ist es allerdings auch denkbar, daß der Werkstoff Hastelloy durch das unedlere Titan kathodisch polarisiert wird. Dies könnte zu einer Schädigung des Hastelloy-Werkstoffes durch H-induzierte Korrosion führen. Ob und inwieweit dies der Fall ist, ist derzeit noch unbekannt und müßte durch Untersuchungen geklärt werden.

Bei Verwendung einer CaCl_2 -Spülung müßte auch bei dieser Werkstoff - Kombination CaO als Puffer zugesetzt werden.

5. Kombinierte Teilstränge aus hochlegiertem Stahl X1 NiCrMoCu 31 27-130 und Titanlegierung (Ti 6AL 4V)

Wegen der vergleichsweise niedrigen Streckgrenze war der Werkstoff X1 NiCrMoCu 31 27 für einen einheitlichen Bohrstrang ausgeschieden. Für einen Teilstrang in Kombination mit der Titanlegierung Ti 6AL 4V ist die Streckgrenze ausreichend.

Hinsichtlich der Korrosionsbelastbarkeit verhält sich diese Kombination vergleichbar der aus Hastelloy C 276 und Ti 6AL 4V.

Da der hochlegierte Stahl ebenfalls zur Gruppe der kaltverfestigten Werkstoffe gehört, gelten die Hinweise hinsichtlich der konstruktiven Auslegung und der Fertigung entsprechend Hastelloy C 276. Darüberhinaus gelten die gleichen Einschränkungen hinsichtlich des Reibschweißverhaltens und der Wiederverschraubbarkeit sowie der Zähigkeit und Fertigungssicherheit bei der Titanlegierung wie bei der Kombination Hastelloy C 276 und Ti 6AL 4V.

...

Auch bei der vorliegenden Werkstoff-Kombination sollte eine CaCl_2 -Spülung mit CaO gepuffert werden.

In der folgenden Übersicht wurden zur Ergänzung der technischen Gesichtspunkte aus der Literatur und derzeitigen Marktinformationen Preisfaktoren für die betrachteten Werkstoffe im Vergleich zum niedriglegierten hochfesten Stahl für glattendige Rohre vergleichbarer Abmessungen zusammengestellt. Diese Faktoren sind nur als Anhaltswerte zu betrachten.

- Faktor 1 : Niedriglegierter Stahl
- Faktor 13 : Hochlegierter Stahl X1 NiCrMoCu 31 27
- Faktor 30 : Hastelloy C 276
- Faktor 30 : Titanlegierung Ti 6Al 4V

Bei den beiden hochlegierten, kaltverfestigten Werkstoffen X1 NiCrMoCu 31 27 und Hastelloy C 276 ist zu berücksichtigen, daß Rohre mit größerem Metergewicht hergestellt werden müssen, um durch aufwendige spanende Bearbeitung die verdickten Anschweißenden zu erhalten. Dieser Aufwand ist in den Faktoren nicht enthalten.

Mit den vorgestellten Alternativen können die hohen Anforderungen an den Bohrstrangwerkstoff erfüllt werden, wobei der Grad der durch zusätzliche Untersuchungen noch abzusichernden Eigenschaften unterschiedlich hoch ist.

Tabelle 1 : Physikalische Eigenschaften (Richtwerte)
Werkstoff: X 2 CrNiMoN 22 5 (AF 22)

Physikalische Eigenschaften	Temperatur in °C				
	20	100	200	300	400
Dichte in Mg/m ³	7,83	7,80	7,77	7,73	7,70
Dynamischer E-Modul in GN/m ²	203	197	189	180	170
Dynamischer G-Modul in GN/m ²	77	74	71	68	64
Mittlerer linearer Wärmeausdehnungskoeffizient (Bezugstemperatur: 20°C) in 10 ⁻⁶ /K	13,1	13,5	14,2	14,6	15,0
Differentieller linearer Wärmeausdehnungskoeffizient in 10 ⁻⁶ /K	13,1	13,9	14,6	15,2	15,8
Mittlere spezifische Wärmekapazität (Bezugstemperatur: 20°C) in kJ/(kg.K)	0,45	0,47	0,50	0,52	0,53
Wahre spezifische Wärmekapazität in kJ/(kg.K)	0,45	0,49	0,53	0,56	0,59
Wärmeleitfähigkeit in W/(m.K)	17	18	19	20	20
Spezifischer elektrischer Widerstand in µΩm	0,78	0,84	0,91	0,96	1,02
Magnetisierbarkeit	vorhanden				

Tabelle 2 : Beurteilungs-Matrix für Drillpipe-Werkstoffe

- + : Einsatzfähig; beständig
- (+): Begrenzt einsatzfähig; eingeschränkt beständig
- (-): Kaum einsatzfähig; wenig beständig
- : Nicht einsatzfähig; nicht beständig
- o : Nicht relevant
- ? : Nicht bekannt

- Werkstoffgruppe I : Niedriglegierte, hochfeste Stähle:
30 CrNiMo 8 (Drillpipe), 36 CrNiMo 4 (Verbinder)
- Werkstoffgruppe II : Martensitgehärtender Stahl: X 2 NiCoMoTi 18 12 4
- Werkstoffgruppe III : Nichtrostender Stahl mit > 13 % Cr:
X 3 CrNiMoAl 13 8 2
- Werkstoffgruppe IV : Hochlegierter Stahl mit > 20 % Cr:
X 1 NiCrMoCu 31 27-130
- Werkstoffgruppe V : Nickel-Basis-Legierung: Hastelloy C 276
- Werkstoffgruppe VI : Titan-Legierung: Ti 6Al 4V
- Werkstoffgruppe VII : Aluminium-Legierung
- Werkstoffgruppe VIII: Magnesium-Legierung

Eigenschaften	Werkstoffgruppe							
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
Festigkeit	+	+	+	+	+	+	-	-
Zähigkeit	+	-	(+)	+	+	(-)	(-)	?
Kriechbeständigkeit	+	+	+	+	+	-	-	-
Dauerfestigkeit	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(-)	-
Korrosion	(+)	(+)	(+)	+	+	(+)	(-)	-
Verschleiß	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	-	-
Fertigung	+	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	+	?
Verschraubbarkeit	o	o	o	o	o	o	o	o
Hakenregellast	+	+	+	-	+	+	-	-
Gesamtbeurteilung	(+)	-	(+)	-	(+)	-	-	-

Tabelle 11.2: Beurteilungs-Matrix für Verbinder-Werkstoffe

Eigenschaften	Werkstoffgruppe							
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
Festigkeit	+	*)	+	+	+	+	-	-
Zähigkeit	+		(+)	+	+	(-)	(-)	?
Kriechbeständigkeit	+		+	+	+	-	-	-
Dauerfestigkeit	+		+	+	+	(-)	(-)	-
Korrosion	(+)		(+)	+	+	(+)	(-)	-
Verschleiß	+		(+)	(+)	(+)	(+)	-	-
Fertigung	+		+	(+)	+	+	+	?
Verschraubbarkeit	+		?	?	?	?	o	?
Fett	?		?	?	?	?	?	?
Gesamtbeurteilung	(+)		(+)	(+)?	+ ?	-	-	-

*)nicht betrachtet

Tabelle 3

DRILL PIPE DESIGN NR.: 111 (Zusammenfassung)

		Rohr	Verbinder		Gewicht
Material		U-170 (30 Cr Ni Mo 8)	36 Cr Ni Mo 4 - 120		
Sicherheitsfaktor		1,1	1,6		
Teufe		Außendurchmesser	Größe	ö. Ø	i. Ø
a	Zoll	mm	-	mm	mm
0 - 2 550	5-1/2	139,7	6-5/8" FH	203,2	108,0
2 550 - 4 350	5-1/2	139,7	5-1/2" IF	187,3	108,0
4 350 - 7 500	5-1/2	139,7	5-1/2" IF	187,3	112,0
7 500 - 13 750	5	127,0	5-1/2" FH	177,8	103,0
13 750 - 14 000	Schwerstangen				218
Stranglast *)					
4254					
Zugreserve					
500					
500 bar Innendruck					
499					
Gesamtlast					
5252					

*) Stranglast unter Berücksichtigung des Auftriebs bei Spüldichtede 1,0 (Wasser)

Tabelle 4

DRILL PIPE DESIGN NR.: 211

(Zusammenfassung)

Material	Rohr		Verbinder		Gewicht	
	U - 170 (30 Cr Ni Mo 4)	36 Cr Ni Mo 4	Größe	1. Ø		
Sicherheitsfaktor	1,25		1,6			
Tiefe	Zell	Außendurchmesser	Wand	Größe	1. Ø	
						Ø
0 - 600	5-1/2	139,7	16,5	6-5/8" FH	101,6	
600 - 2 500	5-1/2	139,7	15	6-5/8" FH	108,0	
2 500 - 4 650	5-1/2	139,7	12,7	5-1/2" IF	105,0	
4 650 - 6 900	5-1/2	139,7	10,54	5-1/2" IF	112,0	
6 900 - 8 950	5	127,0	9,19	5-1/2" FH	101,6	
8 950 - 13 750	5	127,0	7,52	5-1/2" FH	108,0	
13 750 - 14 000	Schwerstangen				218	
					Stranglast *)	4571
					Zugreserve	500
					500 bar Innendruck	417
					Gesamtlast	5517

*) Stranglast unter Berücksichtigung des Auftriebs bei Spüldichtete 1,0 (Wasser)

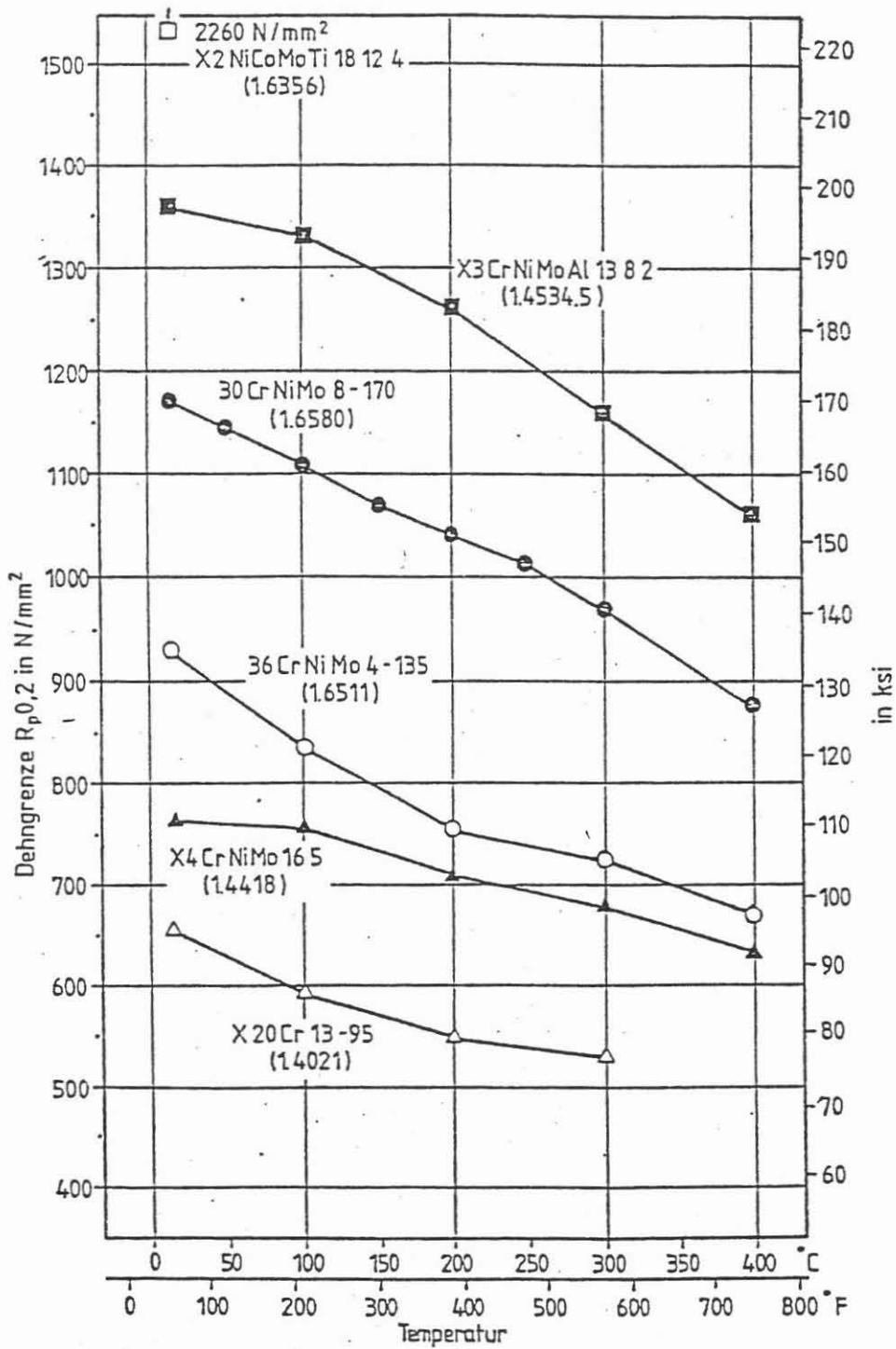


Bild 1: Dehngrenze $R_{p0,2}$ von verschiedenen Stählen in Abhängigkeit von der Prüftemperatur

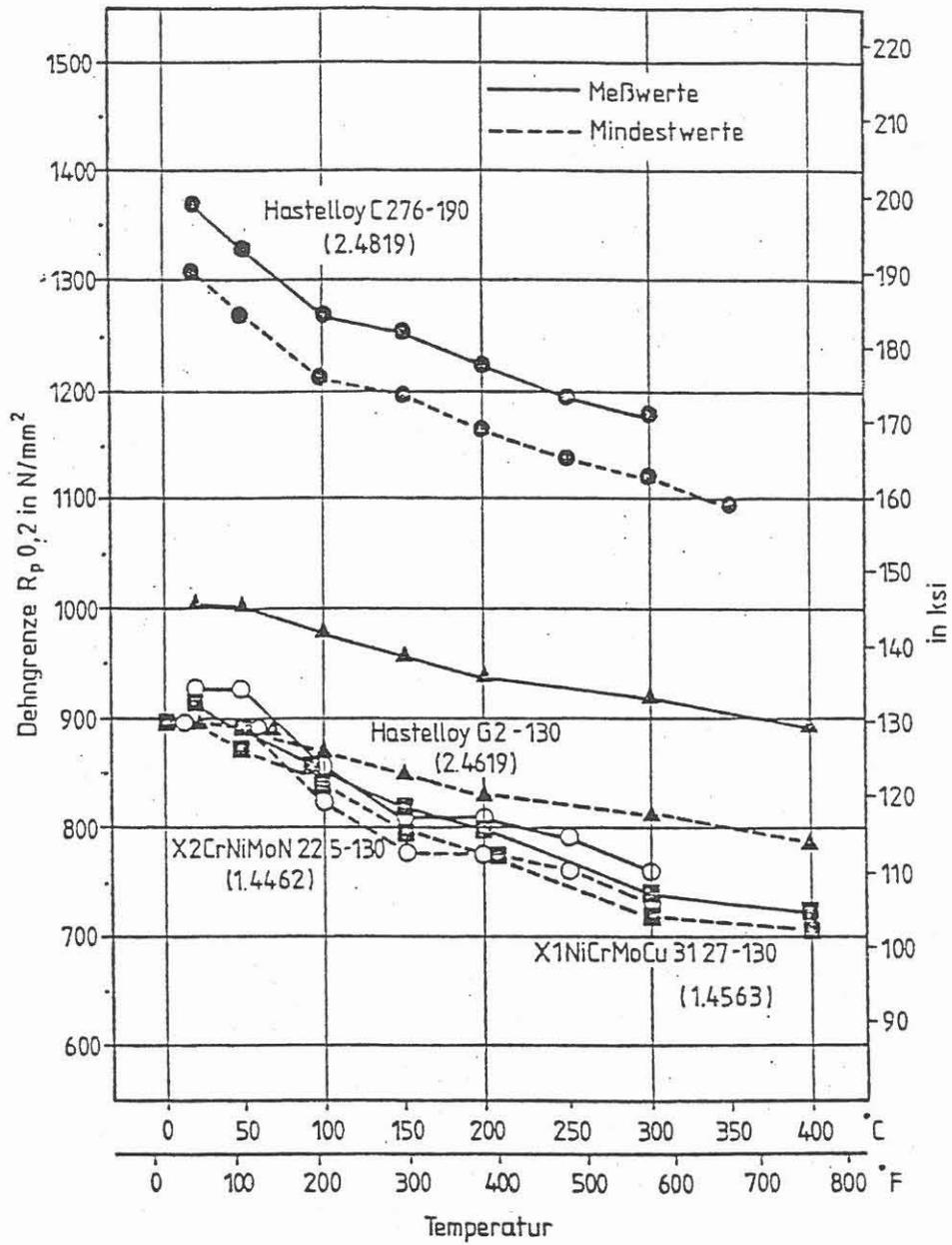


Bild 2 : Dehngrenze $R_p 0,2$ von hochlegierten Stählen und Nickelbasislegierungen in Abhängigkeit von der Prüftemperatur

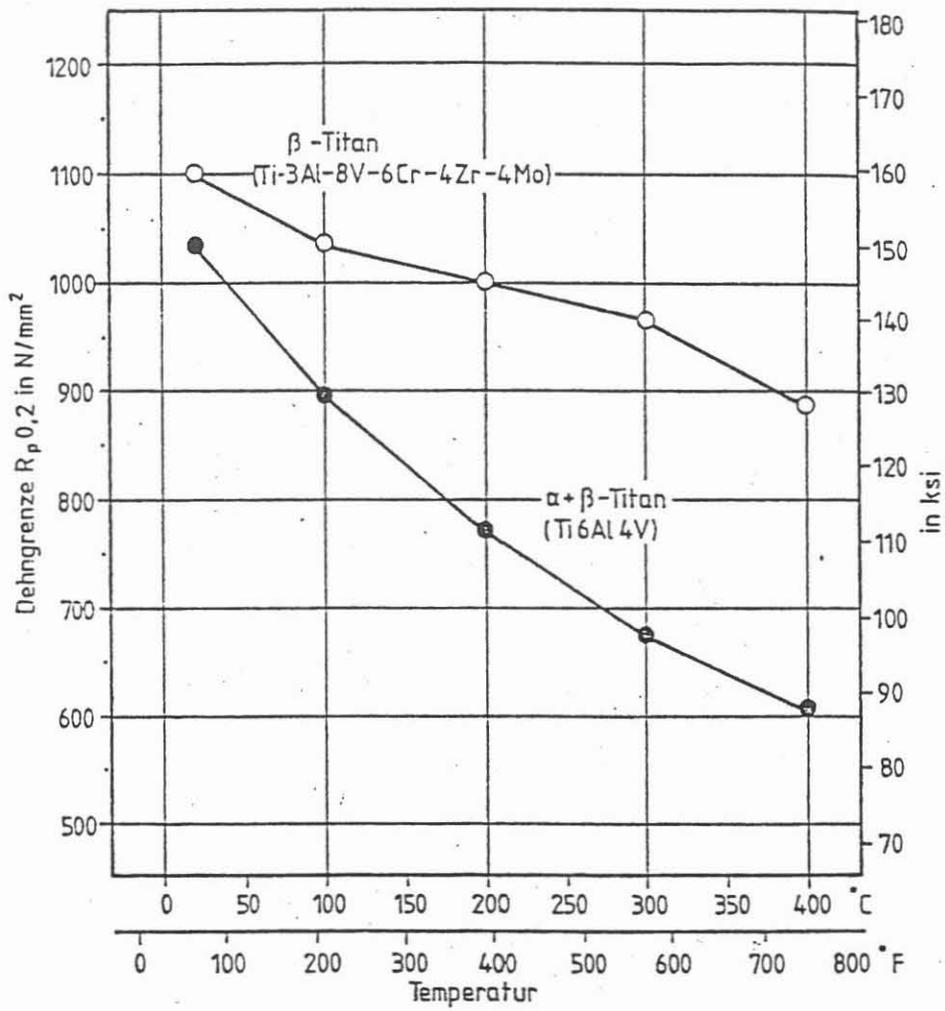


Bild 3: Dehngrenze $R_p 0,2$ von einer β -und $\alpha + \beta$ -Titan-
legierung in Abhängigkeit von der Prüftemperatur

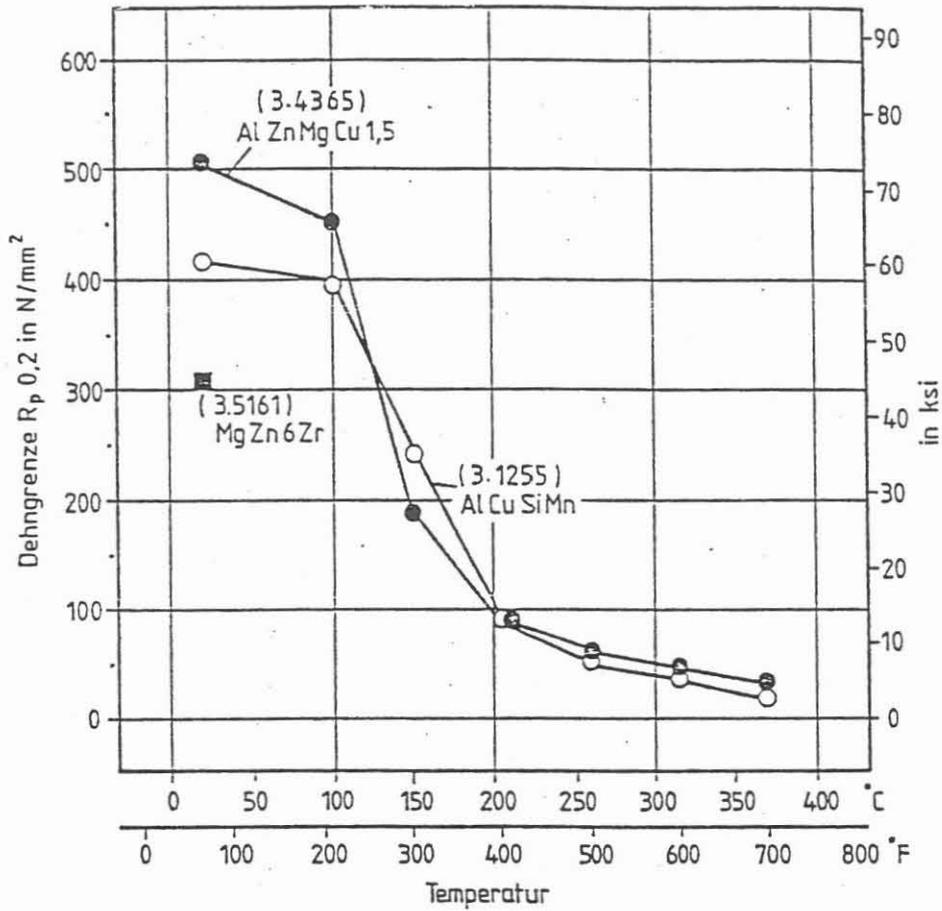


Bild 4 : Dehngrenze $R_p 0,2$ von zwei Aluminiumlegierungen in Abhängigkeit von der Prüftemperatur und einer Magnesiumlegierung bei Raumtemperatur

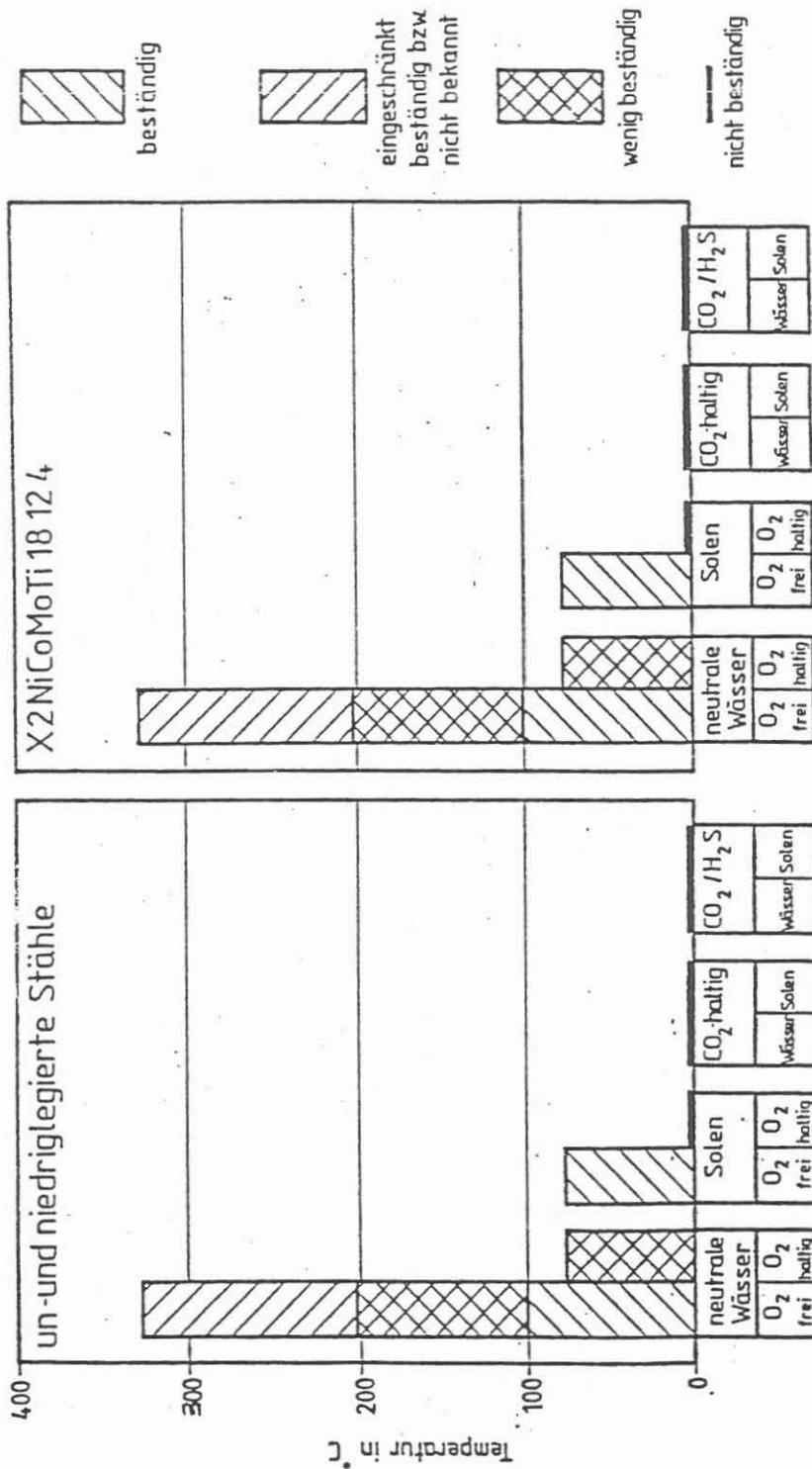


Bild 5: Korrosionsbeständigkeit un- und niedriglegierter sowie Cr-freier martensitischer Stähle

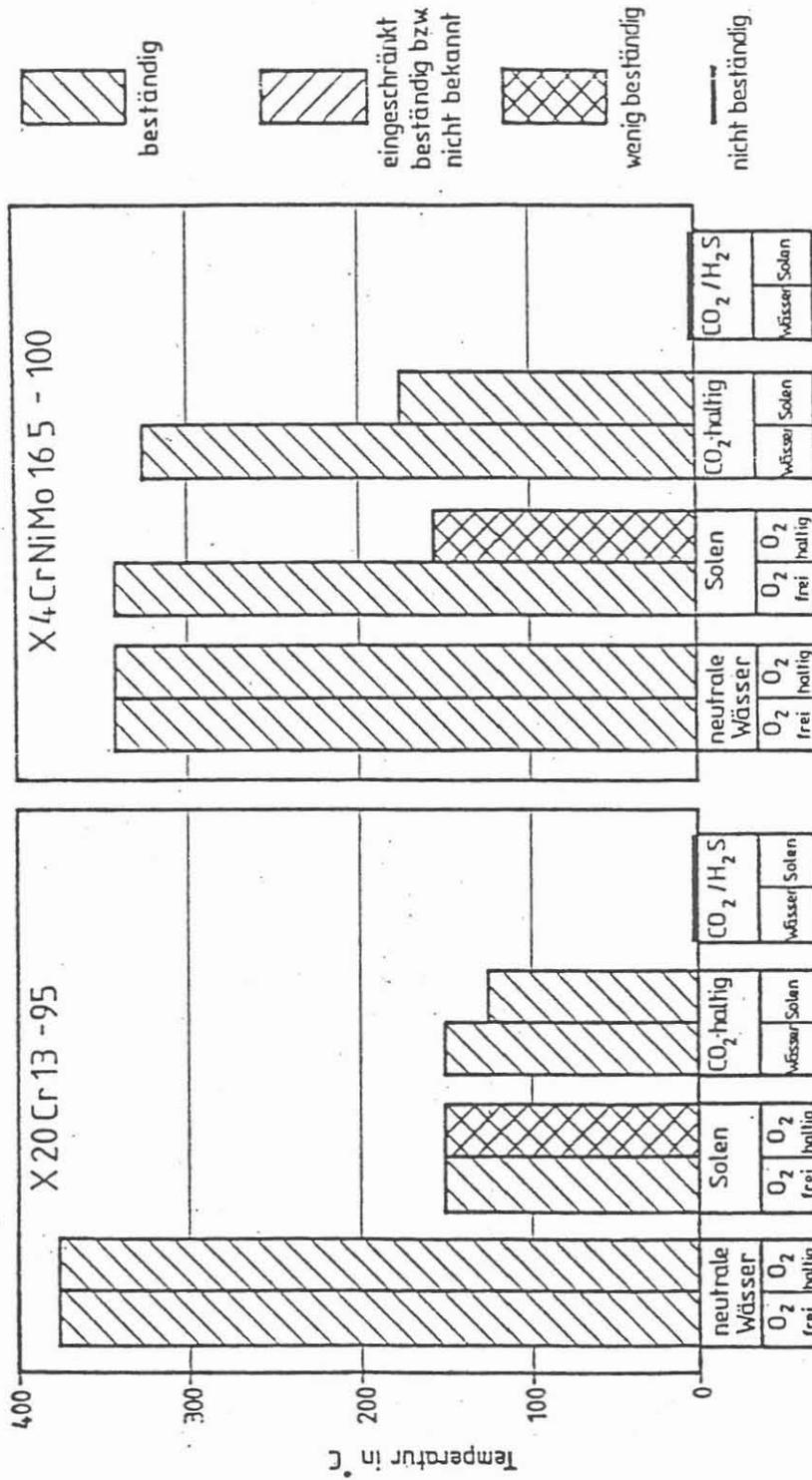


Bild 6 : Korrosionsbeständigkeit Cr- und CrNi-haltiger martensitischer Stähle

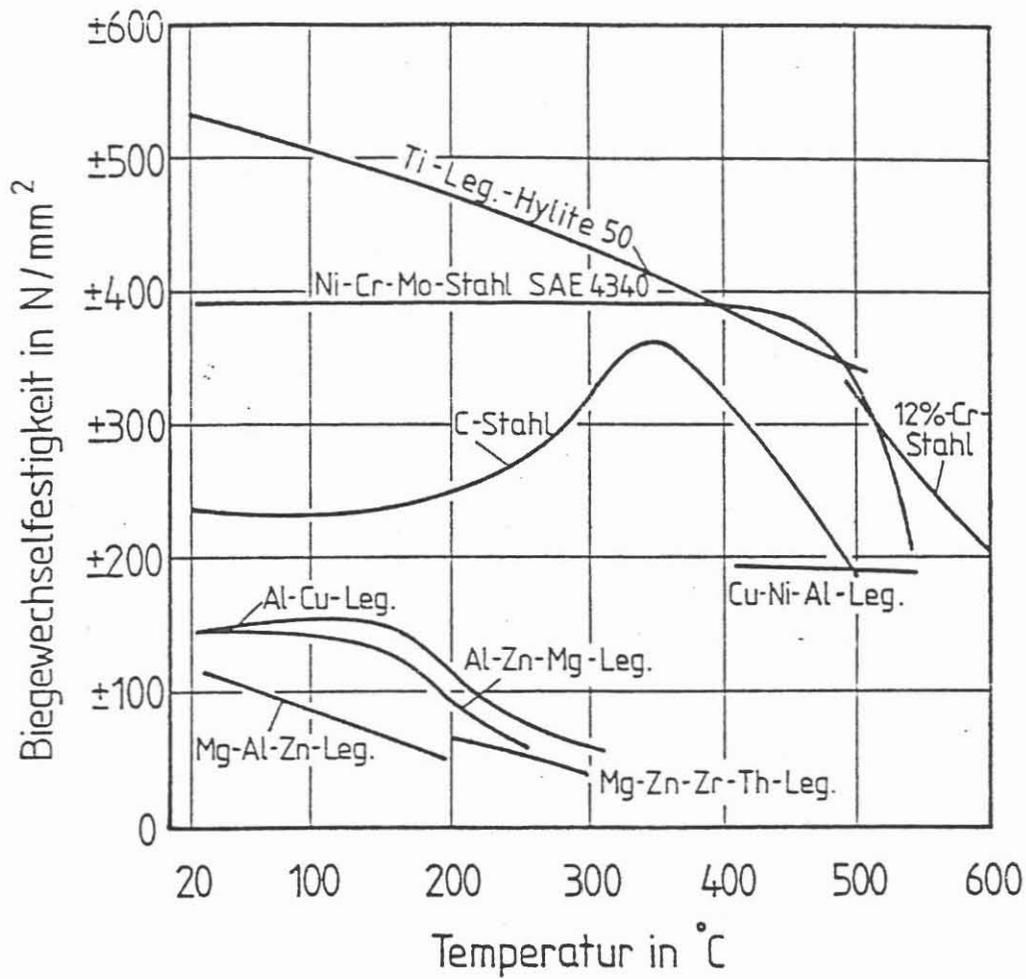


Bild 7 : Temperaturabhängigkeit der Biegeechselfestigkeit von Metallen nach Forrest / 5.4/