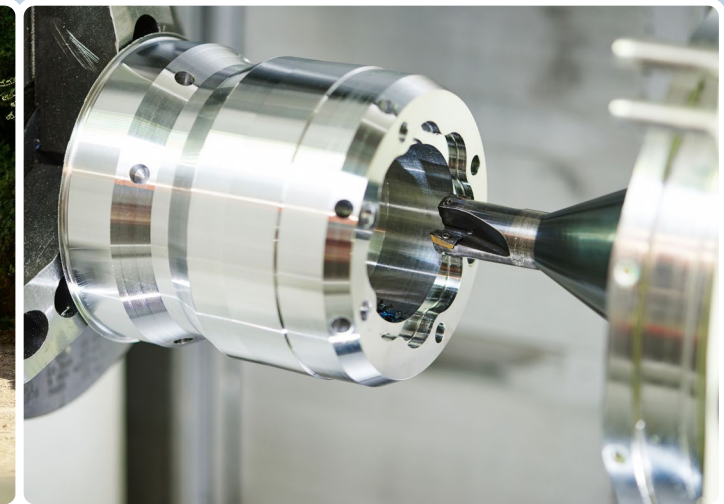


ISSF
INTERNATIONAL
STAINLESS STEEL



Martensitische nichtrostende Stähle





Inhalt

1 Einleitung	3	8 Korrosionsbeständigkeit und Dauerfestigkeit erfordernde Anwendungen	25
2 Das sagen Anwender über Martensite	4	9 Verarbeitung	27
3 Martensite wiederentdecken	5	Wärmebehandlung	27
4 Korrosionsbeständigkeit	8	Abschreckung und Martensitbildung	27
Lochkorrosionsbeständigkeit	8	Anlassen	27
Modifizierte Wirksumme	9	Ausscheidungshärten	28
Spannungsrissskorrosion	9	Spanende Bearbeitung	29
Oxidationsbeständigkeit	9	Schweißen	30
Weiterentwicklung martensitischer Sorten	9	10 Schrifttum	31
Korrosionsvermeidung	10	11 Anhänge	33
Sortenauswahl	11	Anhang 1: EN-Normen zu martensitischen nichtrostenden Stählen	33
Faustregeln	11	Anhang 2: Amerikanische Normen zu martensitischen nichtrostenden Stählen	35
Life Cycle Cost – ein wertvolles Leitkriterium	11	Anhang 3: Analysen der gebräuchlichen Sorten gemäß DIN EN 10088-1	37
5 Physikalische Eigenschaften	12	Anhang 4: Analysen der warmfesten Standardsorten gemäß DIN EN 10302	39
6 Festigkeit und Korrosionsbeständigkeit erfordernde Anwendungen	13	Anhang 5: Analysen der gebräuchlichen Standardsorten gemäß ASTM/AISI	40
Festigkeit	13	Anhang 6: Sorten-Entsprechungen bei martensitischen nichtrostenden Stählen	41
Schlagzähigkeit	15	Anhang 7: Physikalische Eigenschaften martensitischer nichtrostender Stähle	43
Ausgewählte Anwendungen	16	Anhang 8: Martensitische nichtrostende Stähle in der Ölförderung	45
Automobilbau	16	Anhang 9: Mechanische Eigenschaften bei Raumtemperatur einiger wärmebehandelter martensitischer nichtrostender Stähle aus DIN EN 10088-2	46
Öl und Gas	16	Anhang 10a: Empfohlene Wärmebehandlungen für martensitische nichtrostende Stähle gemäß DIN EN 10088-3	48
Bauwesen	17	Anhang 10b: Empfohlene Wärmebehandlungen für ausscheidungs-härtende martensitische nichtrostende Stähle gemäß DIN EN 10088-3	51
Luftfahrt	18		
Maschinenbau	18		
Sonstige Anwendungen	19		
7 Verschleiß- und korrosionsbeanspruchende Anwendungen	20		
Schneidwaren und -werkzeuge	21		
Verschleißbeanspruchende Anwendungen	22		
Wasserkraftwerke	22		
Kugel-, Wälz- und Linearlager	23		
Bremsscheiben für Fahr- und Motorräder	23		
Spritzgussformen für Kunststoffe	24		
Formen für Glasflaschen	24		
Boule-Kugeln	24		



1 Einleitung



Die Publikation "Die ferritische Lösung" von ISSF und ICDA war ein großer Erfolg. Sie zielte darauf ab, Anwendungen der ständig größer werdenden Bandbreite von technisch und wirtschaftlich vorteilhaften ferritischen nichtrostenden Stählen zu fördern. Nunmehr soll die Aufmerksamkeit auf die weitaus weniger im Rampenlicht stehenden, aber gleichermaßen wichtigen martensitischen nichtrostenden Stähle gelenkt werden.

Aufgrund ihrer hohen spezifischen Festigkeit, ihrer hohen Korrosionsbeständigkeit und insbesondere ihrer großen

Härte kommen sie in zahlreichen Anwendungen vor. Die bekannteste dürfte in Messerstählen liegen, die scharfe Schneidkanten bilden können.

Um die Voraussetzungen für weiteres Wachstum dieser Werkstoffgruppe zu schaffen, war es erforderlich, bestehende und potentielle neue Anwendungen zu betrachten, eine technische Einführung zu geben und Aussagen von Verarbeitern zusammenzutragen, die diese Werkstoffe einsetzen und kompetent über deren Nutzen berichten können.

Besonderer Dank gilt Thierry Crémailh, dem Vorsitzenden des ISSF-Langprodukt-Ausschusses und dessen Mitgliedern. Sie entwickelten die Idee zu dieser Publikation und trugen dazu bei, ihr Substanz zu verleihen. Ein weiterer Kreis von Mitgliedern unterstützte die Arbeit und lieferte inhaltliche Beiträge. Besonders erwähnen möchte ich Bernard Héritier, der die Beispiele auswählte, formulierte und die erforderlichen Text- und Bildmaterialien beschaffte. Mein besonderer Dank gilt ferner Dr. Jacques Charles, der es als international bekannter und anerkannter Experte übernahm, das Manuskript mit Anmerkungen und Hinweisen kritisch zu prüfen. Nicht zuletzt danke ich Jo Claes für die praktische Umsetzung der Publikation.

Die Veröffentlichung ist für Hersteller, Händler und Anwender bestimmt und soll sie in ihren eigenen Marktförderungsaktivitäten unterstützen.

Tim Collins
Generalsekretar
International Stainless Steel Forum
Brüssel

2 Das sagen Anwender über Martensite

Sara Nubicella, Managerin Gruppeneinkauf
(DAB Pumps S.p.A., Italien)



DAB Pumps ist ein Hersteller großer vertikaler Pumpen. Deren Wellen müssen beim Einschalten der Pumpen erheblichen Torsionskräften standhalten. Diese Anforderung veranlasste uns dazu, aufgrund ihrer mechanischen Eigenschaften die Sorte EN 1.4028 (AISI 420B) auszuwählen.

Zudem fertigen wir Warmwasser-Zirkulationspumpen. Deren Wellen müssen besonders verschleißbeständig sein. Die Sorte EN 1.40234 (AISI 420C) bietet hierfür ein optimales Eigenschaftsprofil.

Roberto Arcos Pérez, CTO
(ARCOS HNSO, S.A., Albacete, Spanien)



ARCOS Messer werden in Spanien gefertigt. Wir verwenden hochwertige martensitische nichtrostende Stähle in vielen verschiedenen Dicken und Formaten (Bleche oder Coils), und auch in verschiedenen chemischen Zusammensetzungen. Mit Hilfe der Wärmebehandlungen, wie Härten und Anlassen, erhalten wir Messer mit herausragender Schneidkraft und Beständigkeit an der Schneidkante. Martensitischer nichtrostender Stahl bietet hohe Korrosionsbeständigkeit und erleichtert die Einhaltung der internationalen Schneidwarennorm ISO 8442-1.

Pascal Sol-Bruchon, General Manager
(Rousselon Dumas-Sabatier, Thiers, Frankreich)

Wir stellen Messer von höchster Qualität für professionelle Anwender und bekannte Spitzenköche her. Wir haben uns für den nichtrostenden Stahl 1.4116 +N entschieden, einen martensitischen nichtrostenden Stahl mit Stickstoffzusatz, der ein besonders günstiges Eigenschaftsprofil hat, das u.a. große Härte und gute Korrosionsbeständigkeit einschließt. Unsere Messer zeichnen sich durch hohe Qualität aus, die sich in Langlebigkeit und herausragenden Schneideigenschaften äußern – auch nach vielen Schärfungen.

Takayuki Osakabe, General Manager, Designabteilung, ME Business Unit
(YAMAHA MOTOR Co., Ltd., Shizuoka, Japan)



Als Unternehmen Yamaha Motor nutzen wir nichtrostenden Stahl für mehrere Produkte. So enthält mehr als die Hälfte unserer Außenbordmotoren martensitischen nichtrostenden Stahl. Da unsere Motoren über lange Zeiträume auf dem Wasser eingesetzt werden, bestehen hohe Ansprüche an ihre Korrosionsbeständigkeit. Da sie zudem unter besonderen Beanspruchungsbedingungen wie in der Fischerei und im Transportwesen eingesetzt werden, ist auch lange Lebensdauer von besonderer Bedeutung. Wir sind überzeugt, dass zur Erzielung besonderer Zuverlässigkeit martensitischer nichtrostender Stahl der geeignetste Werkstoff ist. Wir werden auch weiterhin nichtrostenden Stahl einsetzen, um unsere strengen Qualitätsanforderungen einzuhalten und unseren Kunden auch in Zukunft absolute Zuverlässigkeit bieten zu können.

Masahito Watanabe, Vorsitzender
(YOSHIDA METAL INDUSTRY Co., LTD., Niigata, Japan)



Seit 1960 setzen wir für die Herstellung der gesamten Klingen unserer Küchenmesser nichtrostenden Stahl ein. Martensitische nichtrostende Stähle sind unentbehrlich, wenn es darum geht, die Schärfe langfristig beizubehalten. Trotz des Nachteils, dass martensitische nichtrostende Stähle aufgrund ihrer Härte schwierig zu verarbeiten sind, gelang es uns nach intensiven Forschungs- und Produktentwicklungsaktivitäten 1983, Ganzstahl-Küchenmesser herzustellen, bei denen Klinge und Griff integriert sind. Unsere Kunden schätzen diese Produkte für ihre Hygieneeigenschaften, denn ein Spalt zwischen Klinge und Griff wird so vermieden. Zudem stellen wir einteilige Küchenmesser durch Schmieden her. Unsere Kunden sind mit der Schärfe

zufrieden, allerdings kommt es gelegentlich zu Reklamationen wegen Korrosion. Tatsächlich bestehen einige falsche Auffassungen, was z.B. die Reinigung in Spülmaschinen oder die absolute Rostbeständigkeit unserer Produkte anbelangt. Wir befinden uns daher in Überlegungen, martensitische nichtrostende Stähle mit erhöhter Korrosionsbeständigkeit einzusetzen.

3 Martensite wiederentdecken

Diese Familie der nichtrostenden Stähle lohnt eine erneute Betrachtung, denn ihr Eigenschaftsprofil wird häufig unterschätzt:

Hochleistungsstähle für den Maschinenbau

Die besonderen mechanischen Eigenschaften martensitischer nichtrostender Stähle reichen an die von Edelbaustählen heran – und bieten darüber hinaus noch eine mittlere bis hohe Korrosionsbeständigkeit.

Anwender von Edelbaustählen finden in ihnen eine Alternative zu Oberflächenbehandlungen, die kostenaufwändig sind, das Recycling erschweren und an Wirkung einbüßen, sobald der Oberflächenschutz beschädigt wird oder verschleißt. Zudem lassen sich einige martensitische nichtrostende Stähle deutlich leichter schweißen oder wärmebehandeln als entsprechende niedriglegierte Edelbaustähle.

Ausgezeichnete Werkzeugstähle

Verschleißbeständigkeit ist nicht allein eine Frage der Härte. In vielen Fällen, z.B. bei Flüssigkeiten mit hohem Feststoffgehalt, ist Verschleiß die Folge sowohl von Erosions- als auch von Korrosionsprozessen. Martensitische nichtrostende Stähle mit hohem Kohlenstoffgehalt verbinden große Härte mit hoher Korrosionsbeständigkeit und stellen damit in vielen Anwendungsfällen eine optimale Kombination dar.

Nachhaltige nichtrostende Stähle

Martensitische nichtrostende Stähle enthalten typischerweise 12–17 % Chrom und 0–5 % Nickel. Der im Vergleich zu austenitischen nichtrostenden Stählen niedrige Nickelgehalt stellt einen zusätzlichen Kostenvorteil dar. Wie andere nichtrostende Stähle auch, ermöglichen martensitische Sorten eine lange Produktlebensdauer und weisen eine besonders hohe Recyclingrate auf.



Preisstabilere nichtrostende Stähle

Neben Eisen sind die Hauptbestandteile von nichtrostendem Stahl Chrom und Nickel. Der Chrompreis ist erfahrungsgemäß vergleichsweise langzeitstabil, was folglich auch für martensitische – und ferritische – Sorten in gleicher Weise gilt. Martensitische nichtrostende Stähle zeichnen sich folglich durch eine hohe Preisstabilität aus, was für viele Anwender ein wichtiges Kriterium ist.

Untergruppen von Martensiten (1-2)

Martensitische nichtrostende Stähle enthalten über 10,5 % Chrom und ihre mechanischen Eigenschaften können – ebenso wie bei Edelmetallstählen – durch Wärmebehandlung beeinflusst werden.

Sie fallen in vier (sich teilweise überlappende) Untergruppen:

1. **Fe-Cr-C-Stähle:** Sie stellen die ersten martensitischen Sorten dar. Bis heute werden sie verbreitet im Maschinenbau und in verschleißbeanspruchten Bauteilen eingesetzt.
2. **Ni-haltige Sorten:** In Ihnen ersetzt Nickel einen Teil des Kohlenstoffs. Im Vergleich zu vorgenannter Gruppe weisen sie höhere Zähigkeit auf, besonders bei niedrigen Temperaturen. Ihr höherer Chromanteil führt auch zu einer höheren Korrosionsbeständigkeit. Molybdänzusätze verbessern sie in den Gruppen 1 und 2 weiter.
3. **Ausscheidungshärtende nichtrostende Stähle:** Sie stellen die beste Kombination zwischen Festigkeit und Zähigkeit dar.
4. **Kriechbeständige Sorten:** mit einem Chromanteil von rund 11 % unterscheiden sie sich von den Stählen der Untergruppe 1 durch Legierungszusätze von Kobalt, Niob, Vanadium und Wismut, welche die Hochtemperatur- und Dauerfestigkeit (bis zu 650 °C) erhöhen.

Zahlreiche Normen umfassen neben den anderen (austenitischen, ferritischen und Duplex-) Sorten auch die martensitischen nichtrostenden Stähle.

Zumeist sind sie nach Erzeugnisformen geordnet. Die **Anhänge 1 und 2** führen die wichtigsten EN- und ASTM-Normen auf. Darüber hinaus gibt es weitere Normen für bestimmte Branchen und/oder Anwendungen.

Untergruppe 1

1a Sorten für den Maschinenbau
 Cr: 10,5–13 %
 C: 0,1–0,4 %
 Typische Vertreter:
 EN: 1.4006, 1.4021, 1.4034
 ASTM: 410, 420

1b verschleißbeständige Sorten
 Cr: 13–17 %
 C: 0,4–1,0 %
 Typische Vertreter:
 EN: 1.4125
 ASTM: 440A/B/C

Untergruppe 2

Cr: 13–17 %
 Ni: 2–5 %
 C: < 0,2 %
 Typische Vertreter:
 EN: 1.4057, 1.4313, 1.4418
 ASTM: 431

Untergruppe 3

Cr: 15–17 %
 Ni: 3–5 %
 Cu: 3–5 %
 Nb
 C: < 0,1 %
 Typische Vertreter:
 EN: 1.4542, 1.4545, 1.4534, 1.4594, 1.4596
 ASTM: 631 (17-4 PH, 15-5 PH)

Untergruppe 4

Cr: 10,5–12 %
 C: < 0,1–0,25 %
 Mo: 0,8–1,5 %
 sowie Zusätze von Co, Nb, V, B
 Typische Vertreter:
 EN: 1.4913, 1.4923

Eindrucksvolle Referenzen

Unter den Erfolgsgeschichten der martensitischen nichtrostenden Stähle ragen drei zugleich typische und äußerst anspruchsvolle Beispiele heraus.

- In der Luft- und Raumfahrt werden hohe Festigkeit, Steifigkeit, Zuverlässigkeit und Korrosionsbeständigkeit gefordert. Das Elektroschlack-Umschmelzverfahren erlaubt es, Werkstoffe in ihrer Bestform einzusetzen.
- Bei der Stromerzeugung ermöglichen es Sorten mit großer Dauerstandfestigkeit, Dampfgeneratoren und -turbinen kontinuierlich bei rund 650 °C zu betreiben. Diese Eigenschaft ist von besonderer Bedeutung, da der größte Teil der weltweiten Stromerzeugung mithilfe von Dampfturbinen erfolgt, wobei fossile Brennstoffe, Biomasse oder Kernenergie als Primärenergie dienen.

- Bei der Öl- und Gasgewinnung werden verbreitet Sorten mit 13 % Chrom dort eingesetzt, wo moderate Temperaturen sowie CO₂- und H₂S-Drücke vorliegen. Neue (zumeist herstellereigenspezifische) Sorten befinden sich in der Entwicklung, die eine erhöhte Beständigkeit gegen (sulfidinduzierte) Spannungsrisskorrosion aufweisen. Sie sollen künftig die Lücke zwischen den martensitischen und den teureren hochkorrosionsbeständigen nichtrostenden Duplexsorten schließen.

Hochwertige Martensite

An einer weiteren Verbesserung der Qualität und der Eigenschaften martensitischer Sorten wird intensiv geforscht. Am besten lässt sich das vielleicht am Beispiel der Schlagzähigkeit zeigen. Weiterentwickelte Herstellungsverfahren erlauben es heutige, einige Sorten bei bis zu -60 °C einzusetzen. Damit eignen sich martensitische nichtrostende Stähle inzwischen auch für bauliche Anwendungen in kalten Klimaregionen. Die Hersteller haben die Bandbreite der Sorten und Eigenschaften deutlich erweitert – häufig in Zusammenarbeit mit ihren Kunden – um den Nutzungsanforderungen zu entsprechen.

Gute Spanbarkeit spart Kosten

Sorten mit verbesserter Spanbarkeit (EN 1.4005 und 1.4029) sind seit langem bekannt, allerdings weisen sie eine verminderte Korrosionsbeständigkeit auf. Inzwischen sind Ca-behandelte martensitische Stähle allgemein marktverfügbar. Sie lassen sich mit Hartmetall besser spanend bearbeiten, ohne dass nennenswerte Einbußen an Korrosionsbeständigkeit auftreten. Von Interesse sind sie folglich überall dort, wo die spanende Bearbeitung einen bedeutenden Kostenfaktor für das Produkt darstellt. Das Potential dieser Sorten hat u.a. die Automobilindustrie erkannt und nutzt sie in vielfältigen Anwendungen.

Während die meisten martensitischen Stahltypen im geglühten Zustand weich und damit leicht spanbar sind, sind ausscheidungshärtende Sorten im geglühten Zustand hart. Zwar lassen sie sich noch spanend bearbeiten, für komplexere Zerspanungsvorgänge sollte ihre Härte jedoch durch Wärmebehandlung abgebaut werden.

Magnetisch und korrosionsbeständig

Die Auffassung, dass magnetischer nichtrostender Stahl kein „richtiger“ nichtrostender Stahl sei und wie unlegierter Stahl roste, ist weit verbreitet – dennoch ist sie unrichtig. Allein deren atomare Struktur bewirkt, dass einige nichtrostende Stähle magnetisch sind und andere nicht. Die Korrosionsbeständigkeit ist aber keine Frage der atomaren Struktur, sondern der chemischen Zusammensetzung – insbesondere des Chromgehalts. Die magnetischen Eigenschaften sind hiervon unabhängig.

Anwendungsgerecht

Die martensitische Werkstoffgruppe kommt häufig dort zur Anwendung, wo zugleich große Härte und hohe Festigkeit erforderlich sind. Dabei ist die Korrosionsbeständigkeit der Legierung mit den anwendungsspezifischen Anforderungen in Einklang zu bringen. Zu beachten ist, dass die Korrosionsbeständigkeit der martensitischen Standardsorten im gehärteten Zustand am höchsten ist. Sie sollten im Allgemeinen also nicht in weichgeglühtem Zustand zur Anwendung kommen. Einige martensitische nichtrostende Stähle haben eine ähnlich hohe Korrosionsbeständigkeit wie die austenitische Sorte EN 1.4301 (AISI 304). Zuweilen ist auch eine geringere Korrosionsbeständigkeit akzeptabel, wenn entsprechende Betriebsbedingungen sichergestellt werden, z.B. wenn die Nutzer angehalten werden, die Oberflächen regelmäßig zu reinigen. Das ist z.B. in der Lebensmittelverarbeitenden Industrie der Fall, wo Messer von großer Härte erforderlich sind.

Bei der wirtschaftlichen Bewertung martensitischer nichtrostender Stähle sind auch die Kosten einer Wärmebehandlung des Werkstoffs mit zu berücksichtigen.

Trümpfe martensitischer Sorten

1. **hohe mechanische Festigkeit** bei Raumtemperatur, höher als die von austenitischen, ferritischen und Duplex-Sorten und ähnlich der von Edelbaustählen
2. bei Sorten mit erhöhtem Kohlenstoffgehalt **große Härte und hohe Verschleißbeständigkeit**
3. **hohe Dauerstandfestigkeit** der Co-/V-/Nb-/W-/B-haltigen Sorten
4. **höhere Steifigkeit** als Titan oder Aluminiumlegierungen, vergleichbar der anderer Stähle
5. **mittlere bis gute Korrosionsbeständigkeit** (austenitische Sorten: gut bis hervorragend)
6. **magnetisch** (einschließlich weichmagnetischer Sorten)
7. **Wärmeleitfähigkeit** bis zu zweimal so hoch wie bei austenitischen Sorten
8. **Wärmeausdehnungskoeffizient** rund $\frac{2}{3}$ dessen austenitischer nichtrostender Stähle
9. Sorten mit **verbesserter Spanbarkeit** (als Alternative zu Automatenstählen) verfügbar

4 Korrosionsbeständigkeit

Nichtrostende Stähle verdanken ihre „rostfreien“ Eigenschaften ihrem Chromgehalt.

In unterschiedlichem Maße sind alle Stähle korrosionsanfällig. Allerdings weisen nichtrostende Stähle aufgrund ihres Chromgehalts im Vergleich zu unlegierten Sorten einen weitaus größeren Korrosionswiderstand auf. Chrom ist also der Schlüsselbestandteil für die Korrosionsbeständigkeit von nichtrostenden Stählen.

Diese wird stärker durch die chemische Zusammensetzung als durch die Gefügestruktur bestimmt. Nickellegierte Sorten haben vor allem deshalb eine höhere Korrosionsbeständigkeit, weil sie auch einen höheren Chrom- und/oder Molybdängehalt aufweisen.

Martensitische Sorten der **Untergruppe 1 (siehe Seite 6)** eignen sich am besten für vergleichsweise gering korrosive Beanspruchungssituationen, etwa in häuslicher Umgebung (wo der Werkstoff entweder nicht mit Wasser in Berührung kommt oder regelmäßig trockengewischt wird). Im Außenbereich können sie zur Anwendung kommen, wo oberflächliche Korrosionserscheinungen tolerabel sind. Unter derartigen Bedingungen haben martensitische nichtrostende Stähle eine längere Lebensdauer als unlegierte.

Werkstoffe der **Untergruppen 2 und 3** sind korrosionsbeständiger als die der Untergruppe 1. Sie bieten sich an für Anwendungen im Kontakt mit Wasser unter insgesamt milden Bedingungen. Werkstoffe der **Untergruppe 4** sind in ihrer Korrosionsbeständigkeit mit denen der Untergruppe 1 vergleichbar, eignen sich jedoch für Dampf von hoher Temperatur. In geringerem Umfang finden sie sich auch in Hochtemperatur-Anwendungen im Automobilbau.

Lochkorrosionsbeständigkeit

Ein Vergleich der unterschiedlichen Sorten martensitischer nichtrostender Stähle mit der austenitischen Sorte EN 1.4301 (AISI 304) in Bezug auf Korrosionsbeständigkeit lässt die Schlüsselrolle von Chrom und Molybdän deutlich erkennen. Er zeigt, dass einige martensitische Sorten die Korrosionsbeständigkeit der nickelhaltigen Sorte EN 1.4301 (AISI 304) erreichen können, wie aus **Abbildung 1** ersichtlich.

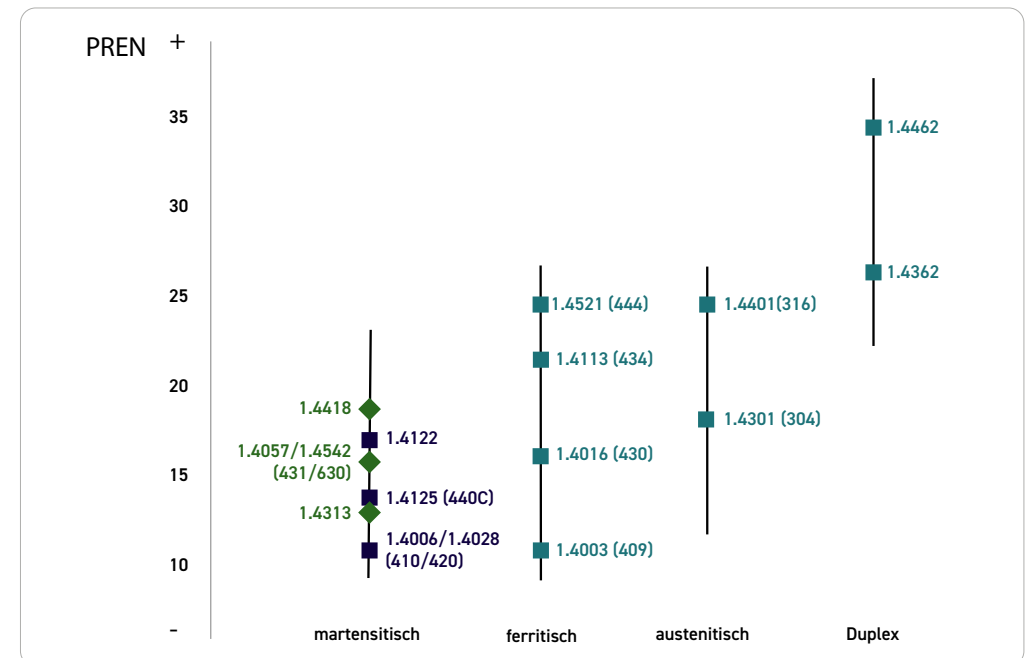


Abb. 1 Lochkorrosionsbeständigkeit ausgewählter Sorten entsprechend ihrer PREN-Werte (Quelle: Aperam)

Modifizierte Wirksumme (PREN_{mod})

- Die Wirksumme (*Pitting Resistance Equivalent Number*, PREN) ist eine Maßzahl für die relative Korrosionsbeständigkeit eines nichtrostenden Stahls in chloridhaltiger Umgebung. Je höher die Wirksumme, desto höher die Beständigkeit einer Sorte gegen Lokalkorrosion. Im Falle der austenitischen Sorten gilt die Formel $PREN = \% Cr + 3,3 \times \% Mo + 16 \times \% N$.
- Bei martensitischen Sorten kann allerdings ein Teil des Chroms in Karbiden gebunden sein, wodurch sich dessen Verfügbarkeit für die Passivschichtbildung verringert.
- Einige Hersteller schlagen die nachstehende modifizierte Formel vor, die im Folgenden auch in der vorliegenden Broschüre verwendet wird:

$$PREN_{mod} = \% Cr + 3,3 \times \% Mo + 16 \times \% N - 5 \times \% C$$

Spannungsrissskorrosion (4-6)

Spannungsrissskorrosion (*Stress Corrosion Cracking* - SCC) kann auftreten, wenn bestimmte Umgebungseinflüsse (Chloride, H₂S oder Wasserstoffdiffusion) mit Spannung (beanspruchungsbedingter Spannung, Restspannung oder beidem) zusammentreffen und den folgenden Schadensmechanismus auslösen:

- Zunächst tritt Lochkorrosion auf.
- Ausgehend von der einsetzenden Lochkorrosion breiten sich Risse trans- oder interkristallin aus.
- Schließlich kommt es zum Versagen.

Hinweise zum Einsatz martensitischer nichtrostender Stähle unter H₂S-haltigen Bedingungen sind der Norm NACE MR0175/ISO 15156 zu entnehmen (siehe auch **Anhang 8**). Eine bekannte Anwendung, bei der mit Spannungsrissskorrosion gerechnet werden muss, ist die Ölgewinnung (Details hierzu **Seite 16**).

In anderen Anwendungen ist Spannungsrissskorrosion bei Dehngrenzen unterhalb von 600 MPa unwahrscheinlich. Oberhalb von 1000 MPa kann sie auftreten, sofern bei der Verarbeitung keine Vorkehrungen gegen die Aufnahme von Wasserstoff getroffen wurden.

Oxidationsbeständigkeit

Im Unterschied zu den zwei vorgenannten Korrosionsarten findet Hochtemperatur-Oxidation nur bei erhöhten Temperaturen statt. Werden nichtrostende Stähle erhitzt, kann das in ihnen enthaltene Chrom eine schützende Zunderschicht bilden, welche die weitere Oxidation verzögert. Zunder und Grundwerkstoff haben unterschiedliche Wärmeausdehnungskoeffizienten. Hierdurch kann die Stabilität der Zunderschicht beeinträchtigt werden, insbesondere bei häufiger zyklischer Temperaturänderung. Der Wärmeausdehnungskoeffizient des Zunders ist sehr niedrig, der des metallischen Werkstoffs hoch. Kommt es zu einer übermäßigen Bildung von Zunder, reißt er oder platzt ab, wenn sich der Grundwerkstoff abkühlt und zusammenzieht. Aufgrund ihres geringeren Wärmeausdehnungskoeffizienten sind martensitische Sorten vergleichsweise wenig anfällig gegen solche Abplatzungen bei hohen Temperaturen. Ohne Risse und Abplatzungen kommt es auch nicht zu weiterer Oxidation.

Dauerstandfeste martensitische nichtrostende Stähle sind für Anwendungen bei hohen Temperaturen bis zu 650 °C bestimmt, z.B. Dampfgeneratoren, Turbinenblätter, Einspritzventile von Automotoren und andere Komponenten.

Weiterentwicklung martensitischer Sorten

In den letzten Jahren sind zahlreiche neue Sorten auf den Markt gekommen. Die meisten davon sind herstellerspezifisch und aus diesem Grund nicht in den aktuellen Normen erfasst.

- Martensitische Sorten mit Stickstoffzusätzen gewinnen zunehmend an Akzeptanz (6-8). Wie anhand der Wirksummen-Formel ersichtlich, erhöht Stickstoff die Beständigkeit gegen Lochkorrosion beträchtlich. Zudem verbessert es die mechanischen Eigenschaften und ist ebenso wie Nickel ein Austenitbildner. Wird Stickstoff hinzulegiert und zudem der Gehalt an Kohlenstoff und Nickel reduziert, entstehen leistungsfähigere und gleichzeitig kostengünstigere Stähle. Ein Problem liegt in der geringen Löslichkeit von Stickstoff in flüssigem Stahl sowie in der ferritischen Deltaphase während der Erstarrung. Gegenwärtig ermöglicht das Druck-Elektroschlack-Umschmelz-Verfahren (DESU) Stickstoffgehalte bis 0,4 %. Niedrigere Stickstoffgehalte lassen sich auch mit dem konventionellen AOD-Prozess erreichen. **Abbildung 2** zeigt, wie ein Legierungszusatz von 0,1 % das Lochkorrosionspotential der martensitischen Sorte EN 1.4116 in abgeschrecktem und angelassenem Zustand verbessert. Messungen ergeben ein noch weiter gesteigertes

Lochkorrosionspotential (470 mV) bei der Sorte EN 1.4060, einem martensitischen nichtrostenden Stahl mit 0,35 % Kohlenstoff, 16 % Chrom und 0,15 % Stickstoff. Typische Anwendungen finden sich in Schneidwaren, Kugellagern und anderen.

- Um die Beständigkeit gegen (sulfidinduzierte) Spannungsrisskorrosion zu steigern, wurden herstellereigenspezifische „Super-13-“ und „-17-Cr-“ Sorten für die Ölindustrie entwickelt (9,10). Typische Analysen sind 13 % Cr, 5 % Ni, 2 % Mo und 17 % Cr, 5 % Ni, 2,5 % Mo, 2,5 % Cu. Deren hohe Korrosionsbeständigkeit (Wirksumme = 20), hohe Festigkeit (Dehngrenze 760 MPa und Zugfestigkeit mindestens 860 MPa) sowie gute Schweißbarkeit dürften in den nächsten Jahren die Anwendungsbreite martensitischer Sorten vergrößern.

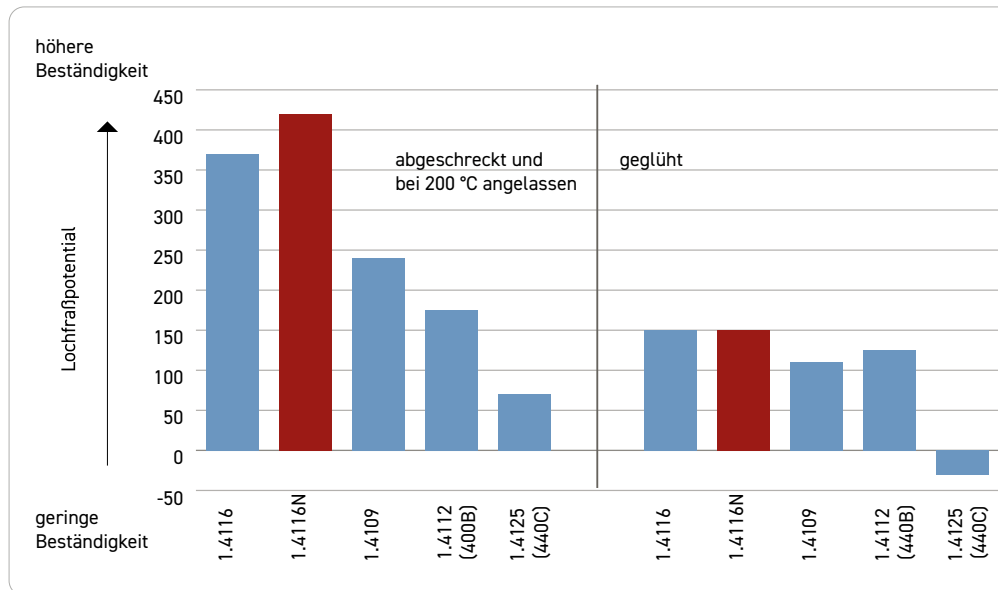


Abb. 2 Lochkorrosionsbeständigkeit in 0,02 M NaCl bei pH 6,6 und 23 °C (Quelle: Ugitech)

Korrosionsvermeidung

Die Passivschicht von nichtrostendem Stahl erfordert Sauerstoff, um intakt zu bleiben. Zunehmende Ablagerungen können den Sauerstoffzutritt an kritischen Stellen beeinträchtigen und zu Spaltkorrosion führen. Durch geeignete konstruktive Maßnahmen lässt sich deren Auftreten weitgehend verhindern.

Korrosion setzt ein, wenn der pH-Wert einen kritischen niedrigen Wert erreicht (niedriger pH-Wert = starke Säure).

Lochkorrosion ist eine weitere, häufig vorkommende Form der Korrosion, die eine örtliche Schädigung der Passivschicht darstellt. Zumeist wird sie durch Chloride und/oder Schwefelverbindungen verursacht, wie sie in industrieller, küstennaher oder Meeresumgebung vorkommen. Vermeiden lässt sie sich zunächst durch Auswahl einer Sorte nichtrostenden Stahls mit zweckentsprechender Korrosionsbeständigkeit (siehe Abbildung 1). Spannungsrisskorrosion kann auftreten, wenn hohe Zugspannung mit aggressiven Bedingungen zusammentrifft. Hierzu sollte sachkundiger Rat eingeholt werden. Ein gewisses Maß an Lokal-(Loch-)korrosion ist in bestimmten Anwendungen möglicherweise akzeptabel.

Risikofaktoren für Korrosion

- eingeschlossene Partikel
- Ablagerungen
- Oberflächenfehler
- Gefügefehler
- Chloridgehalt (salzhaltige Umgebung, Meerwasser usw.)
- hohe Temperaturen
- stark saure Bedingungen

Risikovermindernde Faktoren für Korrosion

- saubere Oberfläche
- glatte Oberfläche
- vorpassivierte Oberfläche
- Auslagerung der Oberfläche
- Reinigungswirkung z.B. von Regen
- erhöhter Chromgehalt
- oxidierende Bedingungen (maßvolle O₂-Einwirkung)

Sortenauswahl

Martensitische Sorten können in moderat korrosiver Atmosphäre eingesetzt werden. Alle Parameter der Betriebsbedingungen sind bei der Sortenauswahl genau zu berücksichtigen. Wenn z. B. geringfügige Lokal-(Loch-)korrosion für die jeweilige Anwendung ohne Belang ist, kann die zweckmäßigste Materialwahl durchaus auf eine eher preisgünstige Sorte fallen.

Faustregeln

Im Falle korrosiverer Bedingungen sollte eine Sorte mit erhöhtem Chrom- und/oder Molybdängehalt verwendet werden. Raue Oberflächen sind zu vermeiden, stattdessen sind feinere Schriffe mit entsprechend geringerem R_a -Wert zu bevorzugen. Spaltartige Geometrien gilt es zu vermeiden.

Life Cycle Cost – ein wertvolles Leitkriterium

Der Wert einer lebensdauerbezogenen Kostenbetrachtung (Life Cycle Costing, LCC) kann gar nicht genug betont werden. Eine solche Berechnung macht häufig deutlich, dass nichtrostender Stahl – der allgemein als kostenaufwändig betrachtet wird –, langfristig betrachtet, tatsächlich der kostengünstigere Werkstoff ist. Seine Korrosionsbeständigkeit bedeutet eine längere Nutzungsdauer, weniger Unterhalt, einen höheren Wiederverkaufswert, ein besseres Erscheinungsbild usw. **Abbildung 3** zeigt ein Beispiel aus der Ölindustrie (11).

Während martensitische Sorten in einigen Branchen stark vertreten sind, werden sie in anderen gerade erst entdeckt. Die zahlreichen bewährten Anwendungen können dabei wegweisend für viele weitere Einsatzmöglichkeiten dieser leistungsfähigen Stähle sein.

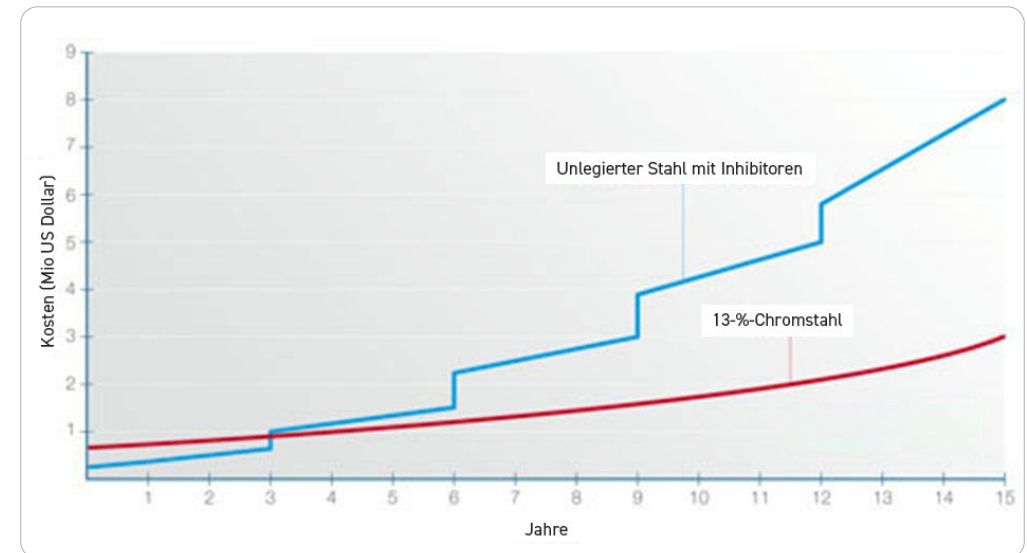


Abb. 3 Zeit-Kosten-Diagramm von unlegiertem Stahl mit Inhibitoren (mit Wartungen) und 13%- Chromstahl in nasser Rauchgaswäsche (Quelle: Vallourec)

5 Physikalische Eigenschaften

Die physikalischen Eigenschaften einer metallischen Legierung umfassen deren Fähigkeit, Wärme oder elektrischen Strom zu leiten oder sich auszudehnen bzw. zusammenzuziehen usw. Die Werte für einige gebräuchliche martensitische nichtrostende Sorten sind in **Tabelle 1** aufgeführt. Eine umfassendere Zusammenstellung findet sich in **Anhang 7**.

Martensitische nichtrostende Stähle sind ferromagnetisch. Gegenüber austenitischen weisen sie einige Vorteile auf. So ist z.B. ihre Wärmeleitfähigkeit deutlich höher. Das bedeutet, dass die Wärmeverteilung vergleichsweise effizient ist – was sie für Anwendungen wie (Rohr- oder Platten-)Wärmetauscher z.B. in Dampfgeneratoren sehr geeignet macht.

Der Wärmeausdehnungskoeffizient martensitischer nichtrostender Stähle ähnelt dem von unlegiertem Stahl und ist deutlich niedriger als bei austenitischen Sorten. Dadurch verziehen sich martensitische Stähle beim Erhitzen weniger stark. Schließlich ist auch der Elastizitätsmodul, der benutzt wird, um die Durchbiegung eines elastisch gedehnten Bauteils zu berechnen, bei Stählen (einschließlich der martensitischen) höher als bei Aluminium oder Titan. Wenn neben Festigkeit und Korrosionsbeständigkeit die maximale Durchbiegung eine kritische Größe ist (d.h., die Steifigkeit ein zentrales Kriterium darstellt), sind martensitische nichtrostende Stähle bevorzugte Werkstoffkandidaten, z.B. in der Luftfahrtindustrie.

EN-Bezeichnung	EN-Werkstoffnummer	AISI	Young-Modul bei 20 °C GPa	Durchschnittlicher Wärmeausdehnungskoeffizient zwischen 20 °C und 100 °C	Wärmeleitfähigkeit bei 20 °C $W \times m^{-1} K^{-1}$	Spezifische Wärmekapazität bei 20 °C $J \times kg^{-1} K^{-1}$	Elektrischer Widerstand $10^{-6} \Omega \times m$
X12Cr13 X12CrS13 X15Cr13	1.4006 1.4005 1.4024	410	215	10,5	30	460	0,60
X30Cr13	1.4028	420	215	10,5	30	460	0,65
X33CrS13	1.4029	420F	215	10,5	30	460	0,55
X46Cr13	1.4034		215	10,5	30	460	0,55
X50CrMoV15	1.4116		215	10,5	30	460	0,65
X39CrMo17-1	1.4122		215	10,4	15	430	0,80
X105CrMo17	1.4125	440C	215	10,4	15	430	0,80
X90CrMoV18	1.4112	440B	215	10,4	15	430	0,80
X17CrNi16-2	1.4057	431	215	10,0	25	460	0,70
X3CrNiMo13-4	1.4313		200	10,5	25	430	0,60
X4CrNiMo16-5-1	1.4418		195	10,3	30	430	0,80
X5CrNiCuNb16-4	1.4542	630	200	10,9	30	500	0,71
X19CrMoNbVN11-1	1.4913		216	10,5	24	460	
X22CrMoV12-1	1.4923		216	10,5	24	460	
austenitischer Stahl	1.4301	304	200	16	15	500	0,72
unlegierter Stahl			215	12	50	460	0,22

Tabelle 1 Physikalische Eigenschaften einiger martensitischer nichtrostender Sorten

6 Festigkeit und Korrosionsbeständigkeit erfordernde Anwendungen

Festigkeit

Die typischen chemischen Zusammensetzungen der gebräuchlichsten Sorten, die aufgrund ihrer Festigkeit ausgewählt werden, sind in **Tabelle 2** dargestellt. Eine umfassende Liste von Normen findet sich in den **Anhängen 1 und 2**.

AISI	EN	C	Cr	Ni	Mo	Weitere
410	1.4006	0,12	12,5			
416	1.4005	0,12	13,00			S =0,25
420	1.4021	0,2	13,00			
420	1.4028	0,3	13,00			
420F	1.4029	0,28	12,75			
420	1.4031	0,39	13,5			
	1.4034	0,46	13,5			
	1.4035	0,46	13,25			S =0,25
430F	1.4104	0,14	16,5		0,4	S =0,25
431	1.4057	0,17	16,00	2,00		
	1.4313		13,00	4,00	0,5	N ≥0,02
	1.4418		16,00	5,00	1,15	N ≥0,02
630	1.4542		16,00	4,00		5C<Nb<0,45 Cu =4,00

Tabelle 2 Durchschnittliche chemische Zusammensetzung einiger verbreiteter Sorten aus DIN EN 10088-1 (vollständige Liste in **Anhängen 3, 4 und 5**)

Im Unterschied zu anderen Gruppen nichtrostender Stähle lässt sich die Festigkeit bei martensitischen Sorten ebenso wie bei Edelbaustählen durch Wärmebehandlung einstellen (**siehe Kapitel 9**). Hierdurch kann der Konstrukteur genau jene Festigkeit wählen, die dem konkreten Anwendungsfall entspricht.

Die Normen definieren für jede Sorte verschiedene Festigkeitsstufen, von der niedrigsten (vollständig geglüht) bis zur höchsten (abgeschreckt und angelassen). Die Mindest-Dehngrenzen einiger gebräuchlicher Sorten im wärmebehandelten (abgeschreckten und angelassenen) Zustand sind in **Tabelle 3** aufgeführt. Eine vollständige Liste findet sich in **Anhang 9**.

EN	AISI	Dehngrenze, min (MPa)
1.4006	410	450
1.4021	420	600
1.4028	420	650
1.4031	420	650
1.4034		650
1.4057	431	700
1.4313		800
1.4418		700
1.4542	630	1000

Tabelle 3 Mindest-Dehngrenze gängiger martensitischer nichtrostender Stähle gemäß DIN EN 10088-3

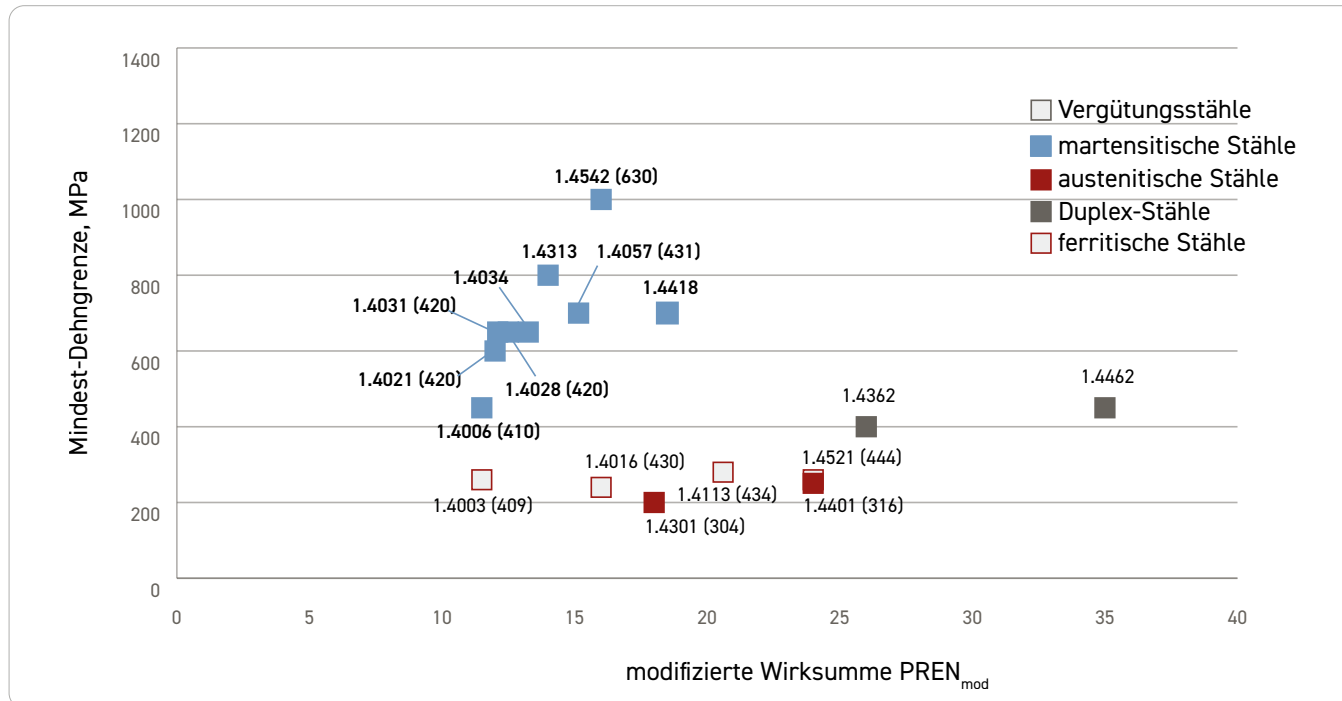


Abb. 4 Vergleich von Mindest-Dehngrenze und Lochkorrosionsbeständigkeit

Anm.: Die mechanischen Eigenschaften (im Falle der martensitischen Stähle im wärmebehandelten Zustand) entsprechen DIN EN 10088-3:2014, jene von Vergütungsstählen DIN EN ISO 683-2:2018

Abbildung 4 zeigt den Zusammenhang zwischen den Mindest-Dehngrenzen einiger martensitischer Standardsorten und deren Korrosionsbeständigkeit und vergleicht sie mit (nicht korrosionsbeständigen) Edelbaustählen sowie ferritischen, austenitischen und Duplex-Sorten.

Martensitische nichtrostende Stähle erreichen in einigen Fällen ein vergleichbares Festigkeitsniveau wie Edelbaustähle bei einer Korrosionsbeständigkeit, die nahezu an jene der bekannten austenitischen Sorte EN 1.4301 (AISI 304) heranreicht (12).

In diesem Zusammenhang sind die Sorten EN 1.4542 (17-4 PH) und EN 1.4418 besonders attraktiv.

Schlagzähigkeit

Die aktuellen Normen enthalten Mindestwerte der Schlagzähigkeit, die weit unterhalb denen liegen, die heute von den meisten Herstellern garantiert werden. Die Schlagzähigkeit und die Übergangstemperatur von zähem zu sprödem Formänderungsverhalten hängen in starkem Maße vom Verarbeitungsverfahren und vom Know-how des Herstellers ab (13).

Abbildung 5 zeigt die Abhängigkeit der Übergangstemperatur (*Ductile to Brittle Transition Temperature*, DBTT) von Phosphorgehalt und Korngröße*. Tatsächlich lassen sich einige martensitische Sorten bei Temperaturen bis zu -60 °C verwenden, was allerdings vorab mit dem Hersteller abgeklärt werden muss.

Übergangstemperatur

Mit Ausnahme der austenitischen nichtrostenden Stähle werden alle Stähle bei niedrigen Temperaturen spröde. Die Temperatur, bei der dies geschieht, wird als Übergangstemperatur bezeichnet.

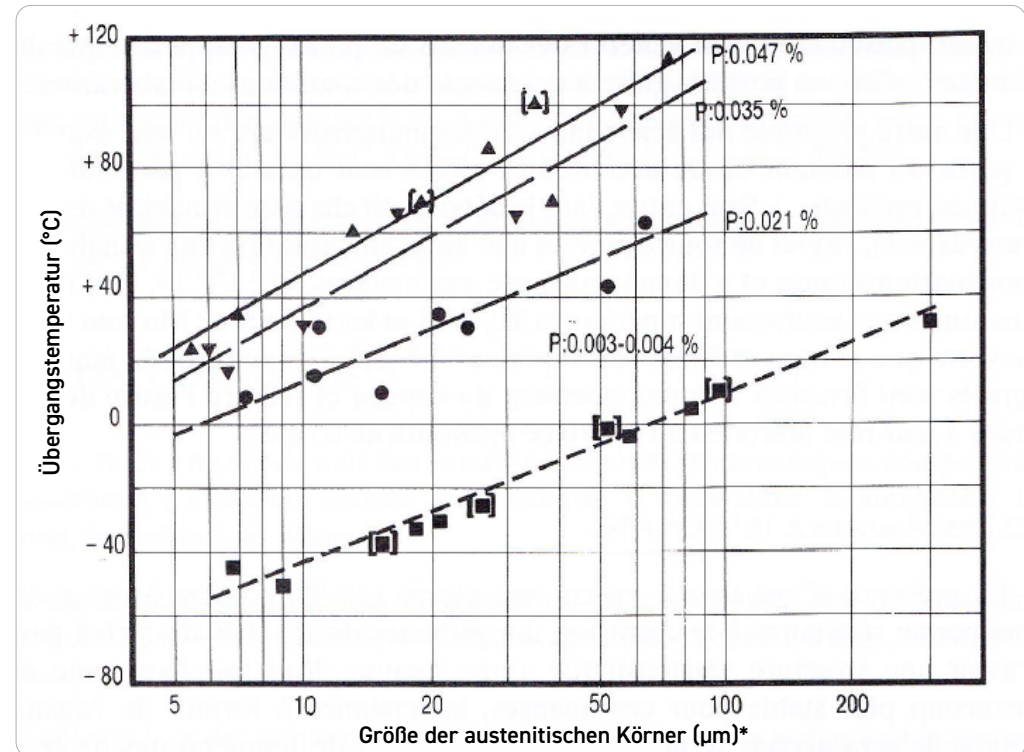
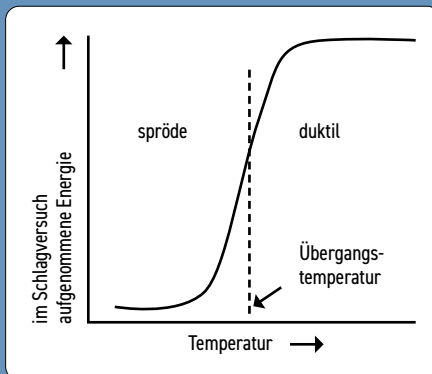


Abb. 5 Abhängigkeit der Übergangstemperatur von Rest-Phosphorgehalt und Korngröße bei einem martensitischen nichtrostenden Stahl mit $0,2\%$ C und 13% C

*Bezieht sich auf das Gefüge (Korngröße) des Stahls in der Phase der Umwandlung zu Austenit während der Wärmebehandlung (siehe Kapitel 9)

Ausgewählte Anwendungen

Automobilbau

Martensitische nichtrostende Stähle werden in einer Vielzahl von Anwendungen eingesetzt, die folgende Gemeinsamkeiten aufweisen:

- hohe Festigkeitsanforderungen,
- Korrosionsbeständigkeit gegen Kraftstoffe oder Außenatmosphäre sowie
- Sicherheitsrelevanz.

Dazu gehören:

- Wellen von Elektromotoren (EN 1.4021, 1.4034, 1.4029...),
- Bauteile von Einspritzpumpen,
- Teile von Common-Rail-Systemen (EN 1.4057, 1.4418),
- Sensoren (EN 1.4542...),
- Einlassventile (EN 1.4718) und
- hochtemperaturbeanspruchte Schrauben (EN 1.4923).

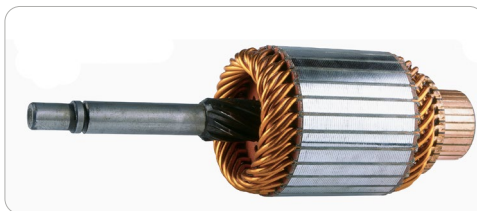
Die Lieferanten müssen den hohen Qualitätsanforderungen der Industrie entsprechen und gleichzeitig wettbewerbsfähige Preise bieten.



Einlassventil aus dem Werkstoff EN 1.4718
(Foto: Deutsche Edelstahlwerke)



Gehäuse einer Einspritzpumpe aus dem Werkstoff EN 1.4418 (Foto: Deutsche Edelstahlwerke)



Welle eines Elektromotors



Sensor

Öl und Gas

Der Antriebsteil eines **Mud-Motors für Ölbohrungen** wandelt die hydraulische Kraft der Hochdruck-Bohrflüssigkeit in mechanische Energie für den Bohrkopf um. Die Antriebseinheit besteht aus zwei Komponenten: einem schraubenförmigen Rotor und einem Stator. Das bedeutet: Die Rotationsenergie wird durch einen Exzentrerschnecken-Mud-Motor erzeugt. Die Anzahl der Stufen des Mud-Motors erhöht die Drehkraft linear bis hin zu den sogenannten Hochleistungs-Antriebseinheiten.

Die Rotoren bestehen aus dem nichtrostenden Werkstoff EN 1.4542 (AISI 630, 17-4PH). Der Stator besteht aus einem kaltgezogenen, wärmebehandelten Rohr mit einem gegossenen, formschlüssig verbundenen Elastomerbauteil innen. Mud-Motoren ermöglichen es, in verschiedene Richtungen, von vertikal bis horizontal, zu bohren und dadurch die Ölgewinnung zu verbessern.



Rotor eines Mud-Motors

Für die Materialauswahl zur **Ölförderung** gibt es internationale Normen (siehe Anhang 8). Abhängig von der erforderlichen Korrosionsbeständigkeit reicht die Bandbreite der für die Verrohrung eingesetzten Werkstoffe (also die Rohre, die das Öl aus der Quelle nach oben fördern) von unlegiertem Stahl über martensitische nichtrostende Stähle bis hin zu Duplex-Sorten und Nickelbasislegierungen.



Martensitische nichtrostende Stähle in der Ölförderung

Martensitische nichtrostende Stähle sind geeignet für die Förderung von süßem Rohöl unter CO₂-haltigen Bedingungen, unter denen unlegierter Stahl eine als Mesakorrosion bekannte (im Englischen auch *ringworm corrosion* genannte) Form der Lokalkorrosion erleiden würde. Noch vor einigen Jahren war die Sorte EN 1.4006 (AISI 410) mit 13 % Cr hierfür nahezu der einzige martensitische Stahl. Inzwischen kommen zunehmend neue (herstellerspezifische) Sorten zur Anwendung, die als supermartensitische Sorten S13Cr und S17Cr bekannt sind. Sie bieten eine größere Anwendungsbreite in Bezug auf Temperatur, H₂S-Gehalt und Chloridkonzentration und schließen damit die Lücke zwischen den 13%-Chromstählen und den Duplexsorten.

Rohre aus martensitischem nichtrostendem Stahl kosten nur ungefähr halb so viel wie solche aus nichtrostendem Duplexstahl und ein Viertel bis ein Zehntel von Ausführungen aus hochnickelhaltigen Legierungen.

Der Einsatz von 13%-Cr-Stahlrohren ist u.U. auch preisgünstiger und kosteneffizienter als von Rohren aus un- oder niedriglegierten Stählen mit Inhibitoren.

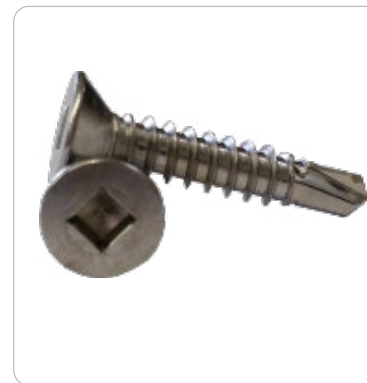
Rohre mit 13 % Chrom sind besonders vorteilhaft für Rohrkonstruktionen in Offshore-Situationen, in denen der Arbeitsraum begrenzt ist und die Wartungskosten hoch sind.

Bauwesen

Bei der Rekonstruktion der Brücke, die zum japanischen Nedujinja-Schrein führt, wurde wegen seiner Langlebigkeit nichtrostender **Bewehrungsstahl** der Sorte AISI 410 (EN 1.4006) verwendet. Dieser Stahl erhielt aufgrund seiner geringeren Wärmeausdehnung und seiner niedrigeren Kosten den Vorzug vor austenitischen Sorten.



Brücke zum Nedujinja-Schrein mit nichtrostendem Bewehrungsstahl AISI 410 (EN 1.4006)
(Foto: JSSA)



Selbstschneidende Schrauben sind für die Befestigung von dünnen Blechen bestimmt und in einer Vielzahl von Kopfformen und Gewinden erhältlich. Wichtigstes Merkmal ist die selbstschneidende Spitze, die das Bohrloch bildet. Eine speziell geformte Lippe transportiert den Span aus der Bohrung ab, so dass der Gewindeteil greifen kann. Die nichtrostende Stahlsorte EN 1.4006 (AISI 410) gehört zu den gängigsten Werkstoffen. Sie bietet zunächst die erforderliche Umformbarkeit und nach der Wärmebehandlung eine gute Härte im Bereich der Spitze.

Luftfahrt

Hochfeste martensitische nichtrostende Stähle und insbesondere die Sorte EN 1.4542 (AISI 630) sind in der Luftfahrttechnik in einer Vielzahl von Anwendungen zu finden, darunter in Hydrauliksystemen, Fahrwerken, Wellen, Aktuatoren, Befestigungsmitteln usw.



Triebwerk eines Passagierflugzeugs
(Foto: Centro Inox)



Fahrwerksteile aus den Werkstoffen EN 1.4548
(17-4PH), umgeschmolzen, und EN 1.4545 (AMS 5659,
ASTM 564) (Foto: Iconos)

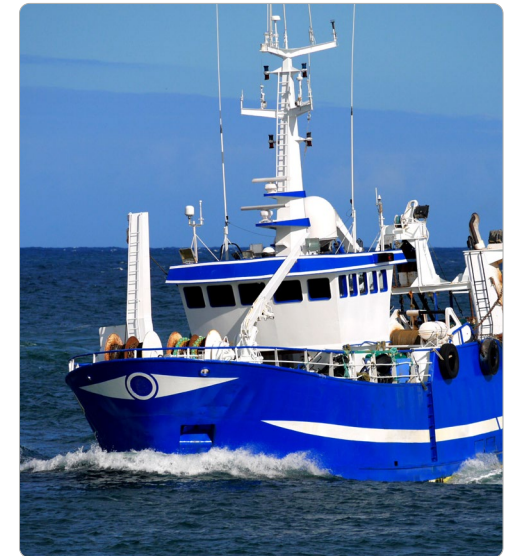


Reaktoring, geschweißt und anschließend auf
engste Toleranzen spanend bearbeitet, für Airbus
A320-330 und Boeing 737, 747, 777 und 787
(Foto: Centro Inox)

Maschinenbau

Antriebswellen (die das Drehmoment vom Motor auf die Schraube übertragen) und Ruder-schäfte finden sich in Sportbooten ebenso wie in Arbeitsschiffen, Barkassen, Fischtrawlern, Lotsen- und Patrouillenbooten. Sie erfordern hohe Festigkeit und eine den Betriebsbedingungen entsprechende Korrosionsbeständigkeit. Die Sorten EN 1.4542 (AISI 630) und EN 1.4418 (AISI S165M) gehören neben Duplex- und stickstoffhaltigen austenitischen Sorten zu den häufig angewandten Stählen.

Martensitische nichtrostende Stähle kommen für Pumpengehäuse, Impeller und Wellen, Ventilgehäuse, Spindeln, Rohrverbinder, Extruder in der Lebensmittelindustrie, Schrauben, lithographische Geräte, Förderbänder usw. zur Anwendung. Bei der Sorte EN 1.4542 (AISI 630) sind hohe Dehngrenze und Elastizitätsmodul in Verbindung mit guter Korrosionsbeständigkeit ideal für spezielle Anwendungen wie z.B. Wägezellen.



Kreiselpumpe



Welle einer Kreiselpumpe



Absperrventil



Ventilschaft



Wägezelle
(Foto: AS Technologies)



Tauchpumpe; Motor-/
Pumpenwelle, Impeller und
Wellenschutzhüllen aus
nichtrostendem Stahl
EN 1.4028 (AISI 420)

Sonstige Anwendungen

Rohre aus martensitischem nichtrostendem Stahl werden auch für Fahrradrahmen propagiert. Das Verhältnis von Festigkeit zu spezifischem Gewicht führt zu Bauteilgewichten, die nahezu gleichauf mit Ausführungen aus der Titanlegierung TA6V und der Aluminiumlegierung 7075-T6 liegen. Solche Rohre werden auch für anspruchsvolle Teile wie Beschläge von Segelschiffen oder für Bergsteigerausrüstungen eingesetzt, die hohe Festigkeit und gute Korrosionsbeständigkeit erfordern.



Fahrradrahmen aus martensitischem nichtrostendem
Stahlrohr EN 1.4006 (AISI 410) oder EN 1.4542
(AISI 630) – Sorten, die wegen ihrer Festigkeit und
Korrosionsbeständigkeit auch für Segelausrüstungen
eingesetzt werden
(Foto: KVA Stainless)



Schiffsausrüstung - hochfester geschmiedeter
Schnappschäkel mit festem Auge aus Werkstoff EN
1.4542 (AISI 630)
(Foto: Wichard SA, Frankreich)



Eisaxt für Bergsteiger
und Eiskletterer mit einer
Spitze aus geschmiedetem
nichtrostendem Stahl, die
wie ein Schneidwerkzeug
geschärft werden kann. Sie
verleiht ausgezeichneten
Halt in Fels und durchdringt
wirksam Eis.
(Foto: Petzl SARL)

7 Verschleiß- und korrosionsbeanspruchende Anwendungen

Martensitische nichtrostende Stähle sind vergleichbar mit Werkzeugstählen. Große Härte ist aus Gründen der Verschleißbeständigkeit erforderlich, häufig kommt aber auch Korrosionsbeständigkeit als weitere Anforderung hinzu, z.B. bei Schneidwaren, Schneidwerkzeugen in der Lebensmittelverarbeitung, beim Einspritzen von abrasiven und/oder korrosiven Polymeren, bei reibender Beanspruchung in Nässe usw.

Martensitische nichtrostende Stähle können nach der Wärmebehandlung (bestehend aus Abschrecken und Anlassen bei rund 200–300 °C, siehe **Kapitel 9**) hohe Festigkeitswerte erreichen, die bis zu etwa 60 HRC betragen können. Diese Werte liegen nahe bei denen von Werkzeugstählen und können **Abbildung 6** entnommen werden. Die durchschnittlichen Analysen von Werkzeugstählen mit mindestens 12 % Cr, die in DIN EN ISO 4957 erfasst sind, sind aus **Tabelle 4** ersichtlich.

Bezeichnung	EN	AISI	C	Cr	Mo	V	W
X155CrMoV12-1	1.2379	D2	1,5	12	0,85	0,85	
X210Cr12	1.2080	D3	2,05	12			
X210CrW12	1.2436	D6	2,15	12			0,7
X42Cr3	1.2083	420	0,39	13,5			
X36CrMo17	1.2316	-	0,39	16,5	1,05		

Tabelle 4 Typische Zusammensetzung „nichtrostender“ Werkzeugstähle aus DIN EN ISO 4957:2018

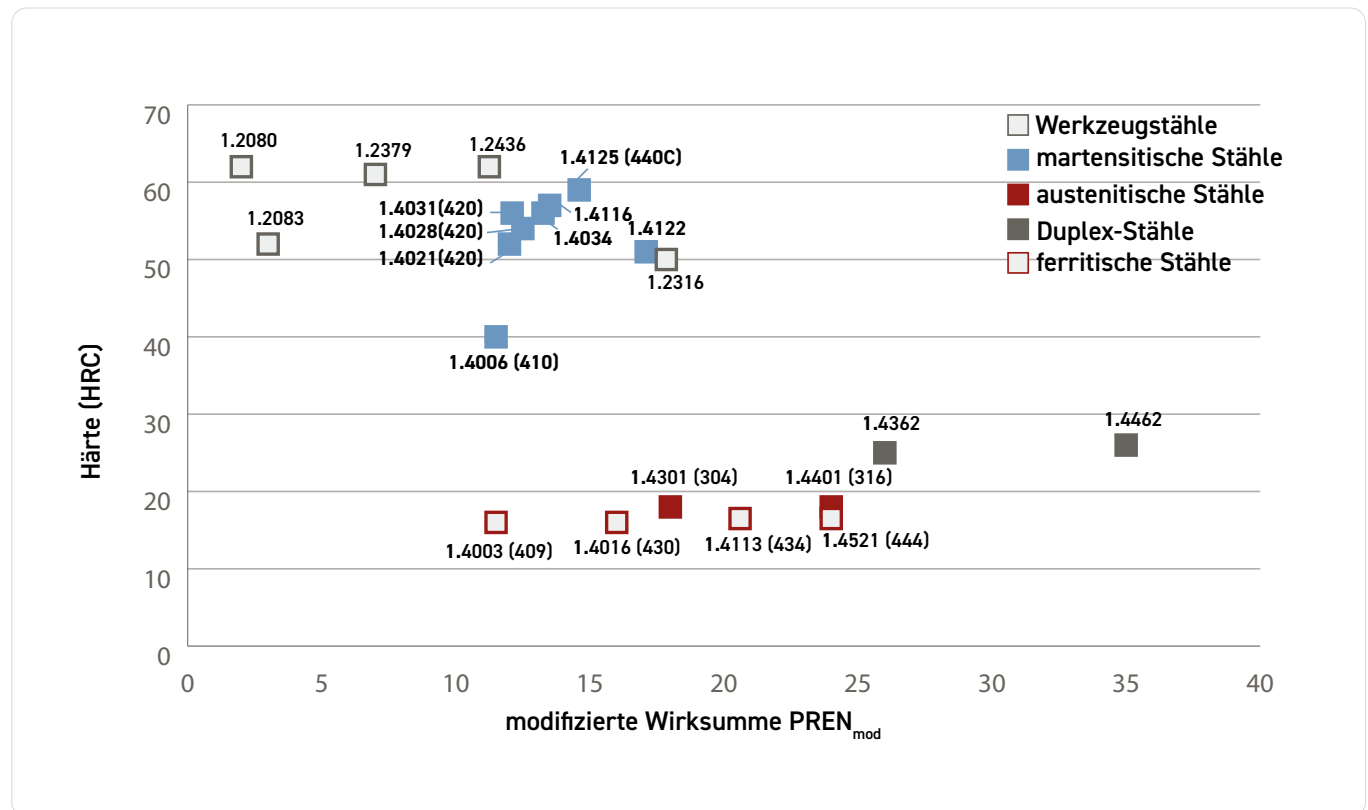


Abb. 6 Zusammenhang von Korrosionsbeständigkeit und Härte

Anm.: Obwohl die Anwendung der Wirksumme außerhalb ihres Geltungsbereiches nicht sachgerecht ist, lässt sich doch sagen, dass der Wert von Stählen mit hohem C- und Cr-Gehalt zwischen denen für nichtrostenden und unlegierten Stahl liegen muss.

Schneidwaren und -werkzeuge

Hierbei handelt es sich um einen der bekanntesten Anwendungsbereiche martensitischer nichtrostender Stähle. Tafelmesser werden nach unterschiedlichen Fertigungsmethoden hergestellt. Klingen können aus Blech geschnitten und anschließend geschärft werden. Die Griffe werden zumeist mit Nieten befestigt. Solche Messer sind preisgünstig. Hochwertigere Tafelmesser werden geschmiedet und anschließend wärmebehandelt und geschliffen. Klinge und Griff bestehen also aus einem Stück Stahl. Hierfür kommt oft die Sorte EN 1.4028 (AISI 420) zur Anwendung. Messer der Spitzenklasse sind wiederum zweiteilig: Sie bestehen aus einer geschliffenen Klinge und einem Griff aus einem anderen Werkstoff, z.B. Silber. In solchen Fällen kommen oft die Sorten EN 1.4122 oder 1.4116 zur Anwendung. Sie weisen hohe Schärfe und gute Korrosionsbeständigkeit auf. Extrem scharfe Messer können im häuslichen Umfeld gefährlich sein. Mikroverzahnungen stellen den besten Kompromiss zwischen Sicherheit und guten Schneideigenschaften dar.

Um Spiegelglanz zu erzielen, ist ein Stahl erforderlich, der frei von Einschlüssen ist, denn sie können schlierenförmige Oberflächenfehler verursachen. Manche nichtmetallischen Einschlüsse (z.B. Mangansulfide) müssen begrenzt werden, da sie Lochkorrosion fördern können. Stähle für Schneidwaren werden entsprechend behandelt, damit hohe metallurgische Reinheit, d.h.

die Abwesenheit nichtmetallischer Einschlüsse, erzielt wird.

Schneidwerkzeuge finden Verwendung z.B. für Skalpelle in der Chirurgie, für V-Klingen, in der Lebensmittelverarbeitung, für Hobbyzwecke usw.

Damaszenerstahl-Messer, Masahiro Co. Ltd., mit Spezialstahlkern und äußerer Hülle aus nichtrostendem Stahl SUS410

(Foto: JSSA)



Gewerbliches Tranchiermesser aus nichtrostendem Stahl mit 0,5 % C und 13 % Cr, geschmiedet und durch Wärmebehandlung auf eine Härte von 55 HRC gebracht (Foto: Sabatier-K)

Messer für den professionellen Gebrauch

Professionelle Messer müssen vor allem gute Schneideigenschaften aufweisen, um körperliche Schäden durch Überanstrengung zu vermeiden. Sie treten auf, wenn Messer nicht ausreichend scharf sind. Der Benutzer muss dann so hohe Kräfte aufbringen, dass Muskeln und Gelenke geschädigt werden. Solche Schädigungen sind vergleichbar mit dem Tennisarm bei Sportlern.

Schneidversuche zeigen, dass die Schneideigenschaften abhängig sind von

- Härte (je höher, desto besser),
- Gefüge (mit feinem Korn und kleinen, fein verteilten Karbiden) und
- sachgerechter Schärfung.

Eine der besten Sorten für diese Anwendung ist der Stahl EN 1.4116.



Klappbares Taschenmesser mit einer nichtrostenden Damaszenerstahl-Klinge und Griff aus Zedernholz
(Foto: Laguiole)



Hochwertiges zweiteiliges Tafelmesser



Rasierklingen aus martensitischem nichtrostendem Stahl



Messer eines Mixers

Verschleißbeanspruchende Anwendungen

Viele Anwendungen erfordern hohe Beständigkeit gegen Erosion/Korrosion, wie sie z.B. von Flüssigkeiten ausgehen kann, die feste Partikel enthalten. Neben Korrosionsbeständigkeit ist in diesem Fall Härte vorteilhaft, so dass martensitische Sorten die beste Wahl darstellen.



Düse eines Hochdruckreinigers aus dem Werkstoff 440C

Wasserkraftwerke

Gegossene Pelton-Turbinenräder und Francis-Turbinen in Wasserkraftwerken bestehen häufig aus dem martensitischen nichtrostenden Stahl EN 1.4313 (ASTM CA6NM). Diese Legierung lässt sich gut und defektfrei in komplexe Formen gießen, sie ist leicht zu schweißen und kann durch Wärmebehandlung auf gute Härtewerte gebracht werden (**siehe Kapitel 9**). Zudem ist sie gut beständig gegen Kavitationserosion, die eine spezielle Form der Erosion/Korrosion darstellt.

Weitere Turbinenteile wie Spiralgehäuse, Turbinenwellen, Austrittsleiträder, Saugrohre usw. bestehen häufig aus demselben Werkstoff.

Der bekannteste Anwendungsfall ist der Drei-Schluchten-Damm in China mit dem derzeit weltgrößten Wasserkraftwerk. Es umfasst 32 Turbineneinheiten von jeweils 700 MW und ist die Anlage mit der größten Kapazität und den größten Generatoren. Das Francis-Laufrad misst 10,05 m im Durchmesser, die Höhe liegt bei 5,00 m und das Gesamtgewicht beträgt 445 t. Die 15 Blätter, jedes 17,6 t schwer, sind mit den Ringen verschweißt. Der eingesetzte nichtrostende Stahl ist ASTM CA6NM (EN 1.4313). Pelton-Laufräder sind häufig auch in kleineren Kraftwerken anzutreffen.



Drei-Schluchten-Talsperre, China



Turbinenrad des Drei-Schluchten-Wasserkraftwerks



Pelton-Turbinenrad



Kegelrollenlager

- X30CrMoN15-1 (EN 1.4108 / AMS 5898) für die Flüssigwasserstoff und -sauerstoff-Pumpen des US-Space Shuttle,
- X40CrMoVN16-2 (EN 1.4123 / AMS 5925) für die Lager der Flüssigstickstoff-Turbopumpen der europäischen Abschussrampe.

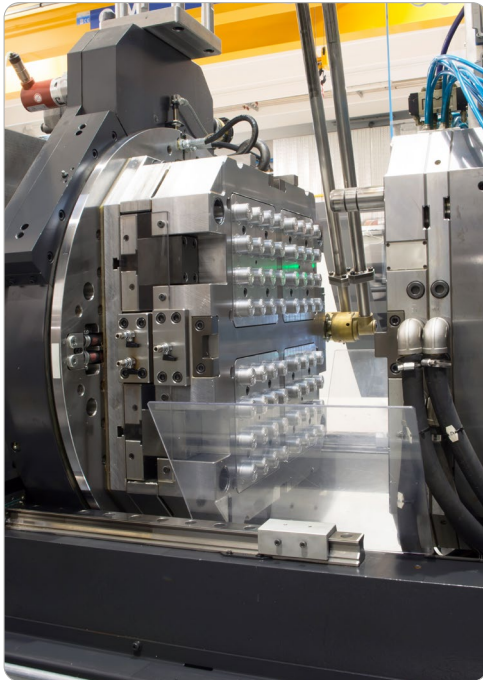
Kugel-, Wälz- und Linearlager

Lager bestehen üblicherweise aus dem legierten Stahl 100Cr6. Für besondere Anwendungen, die Korrosionsbeständigkeit erfordern, werden dagegen die martensitischen Sorten EN 1.4125 (AISI 440C), EN 1.4034 (AISI 420C) und EN 1.4116 bevorzugt. Jüngst wurden auch einige herstellereigene Sorten für höchst anspruchsvolle Einsatzbereiche vorgestellt (14-15):

Bremsscheiben für Fahr- und Motorräder



Nichtrostender Stahl EN 1.4028 (AISI 420) rostet nicht (nennenswert), ist äußerst robust und tolerant gegenüber nahezu allen Bremsbelägen, auch gesinterten. Er ist hochgradig verschleißbeständig, birst nicht und ist auch weitgehend hitzeunempfindlich. Die Reibungskoeffizienten von Bremsscheiben aus nichtrostendem Stahl und gesinterten Bremsbelägen übertreffen seit rund zwanzig Jahren die von Gusseisernen.



Spritzgussformen für Kunststoffe

Spritzgussformen für Polymere müssen die Herstellung von Tausenden oder sogar Millionen von Teilen überdauern. Verschleißbeständigkeit ist eine Kernanforderung. Wenn Polymere korrosiv sind oder Feststoffpartikel enthalten, ist Korrosionsbeständigkeit ein Muss und martensitische nichtrostende Stähle kommen zur Anwendung, z.B. die Sorten EN 1.4057 (AISI 431) oder 1.4122. Da die Geometrie der Formen komplex ist und die spanende Bearbeitung kostenintensiv, wird die Wärmebehandlung häufig an endformnahen Teilen ausgeführt. Sind die Anforderungen an die Oberflächenqualität der Kunststoffteile nicht allzu hoch, erhalten meist Sorten mit verbesserter Spanbarkeit (**siehe Kapitel 9**) den Vorzug, wodurch die Verarbeitungskosten sinken.



Formen für Glasflaschen

Für Hohlglasformen wird zumeist der nichtrostende Stahl EN 1.4057 (AISI 431) ausgewählt. Er bietet ausgezeichnete Beständigkeit gegen Temperaturzyklen; die Oberfläche bleibt sehr sauber, was für qualitativ hochwertige Glasteile von zentraler Bedeutung ist. Für Gläser mit niedriger Schmelztemperatur wird zumeist die Sorte EN 1.4542 (AISI 630) bevorzugt. Im Gegensatz dazu können Gläser mit besonders hohem Schmelzpunkt kostenintensive Nickelbasislegierungen erfordern.

Boule-Kugeln

Bei dieser entspannenden Sportart, die gern auch im Sommerurlaub im Freien ausgeübt wird, werden verchromte oder nichtrostende Stahlkugeln verwendet. Für Kugeln der höchsten Qualitätskategorie ist die Sorte EN 4006 (AISI 410) ein bevorzugter Werkstoff. Er ermöglicht lange Lebensdauer, ohne dass Vorkehrungen gegen Korrosion getroffen werden müssten. Der Härtegrad wird, den gewünschten Eigenschaften entsprechend, weich oder hart eingestellt.



8 Korrosionsbeständigkeit und Dauerfestigkeit erfordernde Anwendungen

Bestimmte nichtrostende Stähle werden speziell wegen ihrer ausgezeichneten Hochtemperatureigenschaften und ihrer Dauerstandfestigkeit bis zu 650 °C häufig in Dampfgeneratoren und Dampfturbinen eingesetzt (16). Zwar sind bestimmte austenitische nichtrostende Stähle und Nickelbasislegierungen noch leistungsfähiger, allerdings zu erheblich höheren Kosten.

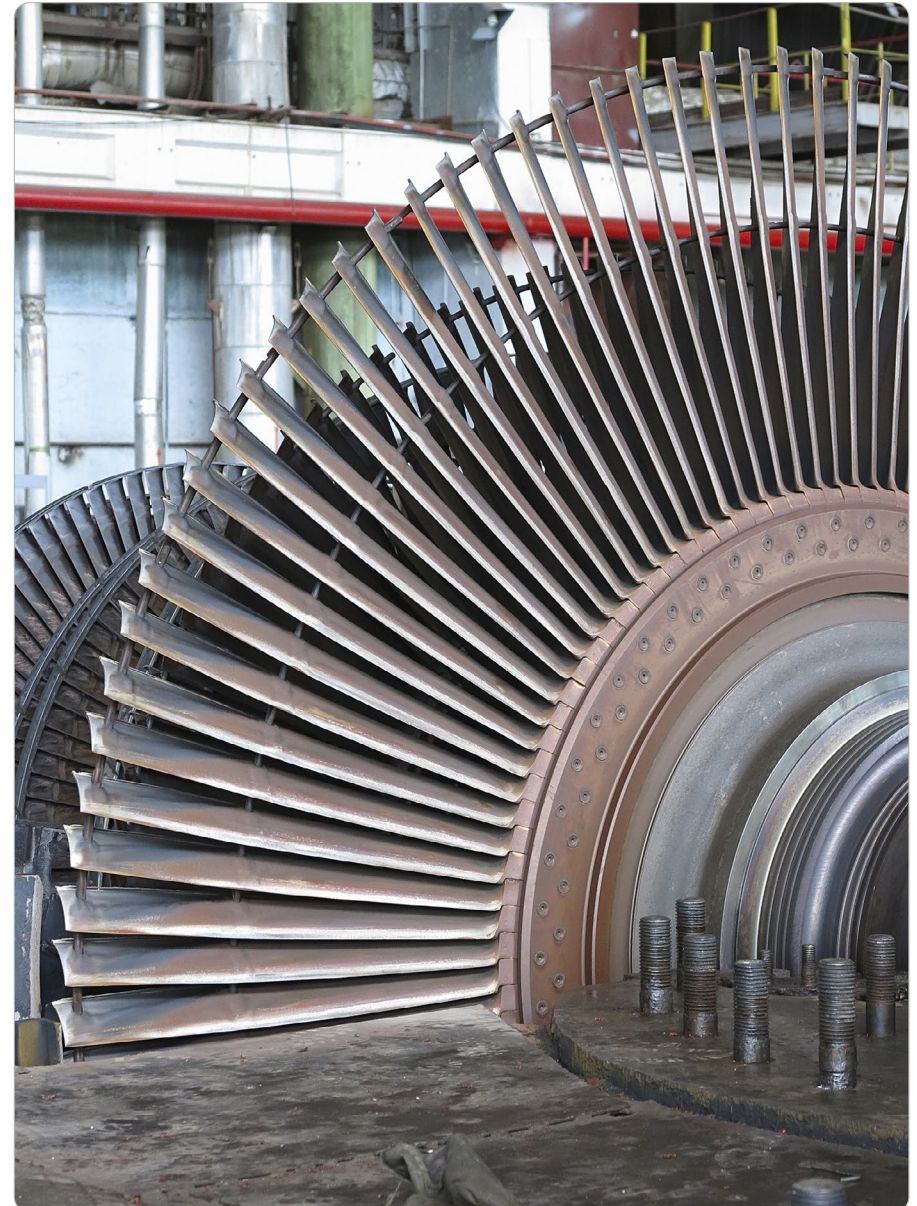
Typische Zusammensetzungen sind aus **Tabelle 5** ersichtlich, die genauen Analysen werden in **Anhang 4** aufgeführt.

EN-Kurzname	EN-Werkstoff-Nummer	C	Cr	Mo	Ni	Co	N	Nb	V	W	B
X10CrMoVNb9-1	1.4903	0,10	8,75	0,95			0,03	0,08	0,22		
X11CrMoWVNb9-1-1	1.4905	0,11	9,00	1,00	0,25		0,07	0,08	0,22	1,00	0,0026
X8CrCoNiMo10-6	1.4911	0,08	10,50	0,75	0,70	6,00		0,35	0,25		0,01
X19CrMoNbVN11-1	1.4913	0,20	10,75	0,65	0,40		0,08	0,35	0,20		
X20CrMoV11-1	1.4922	0,20	11,75	1,00	0,55				0,30		
X22CrMoV12-1	1.4923	0,21	11,75	1,00	0,55				0,30		
X20CrMoWV12-1	1.4935	0,20	11,75	1,00	0,55				0,28	0,50	
X12CrNiMoV12-3	1.4938	0,12	11,75	1,75	2,50		0,03		0,33		

Tabelle 5 Durchschnittliche chemische Analyse warmfester martensitischer nichtrostender Stähle gemäß DIN EN 10302

Wie dieser Tabelle zu entnehmen ist, dienen bestimmte Legierungselemente dazu, die Hochtemperatureigenschaften gezielt zu optimieren (17-20):

- Molybdän verbessert die Korrosionsbeständigkeit. Da es ein Ferritbildner ist, muss es durch einen leicht erhöhten Nickelgehalt ausgeglichen werden.
- Kobalt und Wolfram wirken in der raumzentrierten Matrix hauptsächlich stabilisierend auf Mischkristalle.



- Niob und Vanadium sind starke Karbonitridbildner. Sie bilden äußerst kleine Ausscheidungen, welche Versetzungen an den Korngrenzen blockieren und dadurch dem Stahl Festigkeit sowie Kriechbeständigkeit verleihen.
- Gelöstes Bor (also nicht in Form von Bornitriden) vermindert die Kornvergrößerungsrate von $M_{23}C_6$ -Karbiden in der Nähe vorheriger austenitischer Korngrenzen bei hohen Temperaturen. Hierdurch sinkt die Kriechrate* und die Zeitstandlebensdauer verlängert sich.

Anwendungen von nichtrostendem Stahl umfassen Turbinenschaufeln und andere Bauteile, Wärmetauscherrohre, Ventile, Schrauben, Rohrverbinder sowie verschiedene Hochtemperaturteile für Verbrennungsmaschinen.

* Kriechverhalten

Bei erhöhten Temperaturen und konstanter Beanspruchung oder Last verformen sich viele Werkstoffe langsam weiter. Dieses Verhalten wird als Kriechen bezeichnet. Es ist für die Konstruktion insofern von großer Bedeutung, als es die Nutzungsdauer von Bauteilen begrenzt.



Rohrwärmetauscher

9 Verarbeitung

Wärmebehandlung

Um ihre optimalen Eigenschaften zu erreichen, bedürfen martensitische nichtrostende Stähle einer Wärmebehandlung (21,22).

Martensitische nichtrostende Stähle sind sowohl in geglühtem als auch in abgeschrecktem und angelassenem Zustand erhältlich. In letzterem Fall erfordern sie keine weitere Wärmebehandlung. Dies ist also die einfachste Anwendungsform, die in vielen Bereichen anspruchsgerecht ist.

Allerdings sind dann die weitere Verarbeitung und insbesondere die spanende Bearbeitung deutlich schwieriger und kostenintensiver. Ggf. empfiehlt es sich, martensitischen nichtrostenden Stahl in geglühtem Zustand zu verarbeiten und erst im fertigen oder endformnahen Zustand wärmezubehandeln. **Anhang 10** enthält Empfehlungen für die Wärmebehandlung.

Die **Austenitisierung** muss bei einer Temperatur erfolgen, die

- hoch genug ist, um eine ausreichende Karbidlösung im Austeniten zu ermöglichen,
- jedoch niedrig genug, um Kornvergrößerung zu verhindern.

Eine dreißigminütige Temperierung ist in der Regel ausreichend. DIN EN 10088-3 gibt Empfehlungen für den Temperaturbereich der Austenitisierung. Die ASM-Empfehlungen sind nahezu identisch.

Abschreckung und Martensitbildung

Obwohl sich Austenit bei der Abkühlung nicht in Martensit umwandelt, ist dennoch eine Kühlung mit Öl oder Luft erforderlich, um unerwünschte Karbidausscheidungen an den Grenzen der austenitischen Körner zu verhindern. Sie würden chromverarmte Zonen an den Korngrenzen bilden, die Ausgangspunkte von Korrosion sein können. Zudem beeinträchtigen sie die Schlagzähigkeit. Die schnellere Abkühlung in Wasser erhöht die Materialspannungen und kann zu Verzug oder in einigen Fällen sogar zu Rissbildung im wärmebehandelten Teil führen.

Die Temperatur M_s , bei der die Martensitumformung einsetzt, ist abhängig von der Legierungszusammensetzung des Stahls. Die gebräuchlichste Formel lautet:

$$M_s \text{ (}^\circ\text{C)} = 491,2 - 302,6 \times \% \text{C} - 30,6 \times \% \text{Mn} - 16,6 \times \% \text{Ni} - 8,9 \times \% \text{Cr} + 2,4 \times \% \text{Mo} - 11,3 \times \% \text{Cu} + 8,58 \times \% \text{Co} + 7,4 \times \% \text{W} - 14,5 \times \% \text{Si}$$

Dabei sind die Prozentangaben Gewichtsprozent (23).

Eine entsprechende Formel für die Temperatur M_f , bei der die Martensitumformung endet, besteht nicht. Üblicherweise liegt sie zwischen 150 °C und 200 °C unterhalb von M_s .

Die Haupt-Legierungsbestandteile martensitischer nichtrostender Stähle, C, Cr und Ni, senken M_s . Im Falle der am höchsten legierten martensitischen nichtrostenden Stähle kann dieser Wert so niedrig liegen, dass die Martensitumwandlung bei Raumtemperatur nicht abgeschlossen ist. Dann ist eine weitere Abkühlung bis auf -100 °C erforderlich. Die Stahlhersteller geben Hinweise für die optimale Wärmebehandlung.

Anlassen

Martensit ist hart und spröde. Er weist ein hohes Maß an Materialspannung auf, das – besonders bei höher kohlenstoffhaltigen Sorten – zu Rissbildung führen kann. Deshalb muss dem Abschrecken eine Wärmebehandlung nachgeschaltet werden. Dabei verringert sich die Härte in Abhängigkeit von Temperatur und Zeit entsprechend **Abbildung 7**.

Der Spannungsabbau bei Temperaturen von 200–300 °C verringert die Härte nur unwesentlich. Er wird bei Schneidwaren und -werkzeugen sowie zuweilen bei Formen vorgenommen. Im Gegensatz zum Glühen beeinträchtigen Spannungsabbau und Anlassen die Korrosionsbeständigkeit nicht, weil sich dabei zuerst Eisenkarbide bilden und der Chromgehalt der Matrix nicht verringert wird.

Das Anlassen geschieht bei Temperaturen über 500 °C (**Abbildung 7**). Es vermindert die Härte, stellt aber Dehnbarkeit und Zähigkeit wieder her.

Im Gegensatz zum Glühen beeinträchtigen Spannungsabbau und Anlassen die Korrosionsbeständigkeit nicht, weil sich dabei zuerst Eisenkarbide bilden und der Chromgehalt der Matrix nicht verringert wird.

Glühbehandlungen erfolgen bei der höchsten Temperatur, die noch mit der Martensitumwandlung vereinbar ist. Ihr Zweck liegt darin, einen möglichst weichen Werkstoff zu erzielen, vor allem im Interesse der Verarbeitbarkeit. Bei einigen Sorten ist eine doppelte Glühbehandlung erforderlich.

Die Mindestanforderungen an die mechanischen Eigenschaften nach der Wärmebehandlung sind in Normen (ISO, EN, ASTM/AISI) festgelegt.

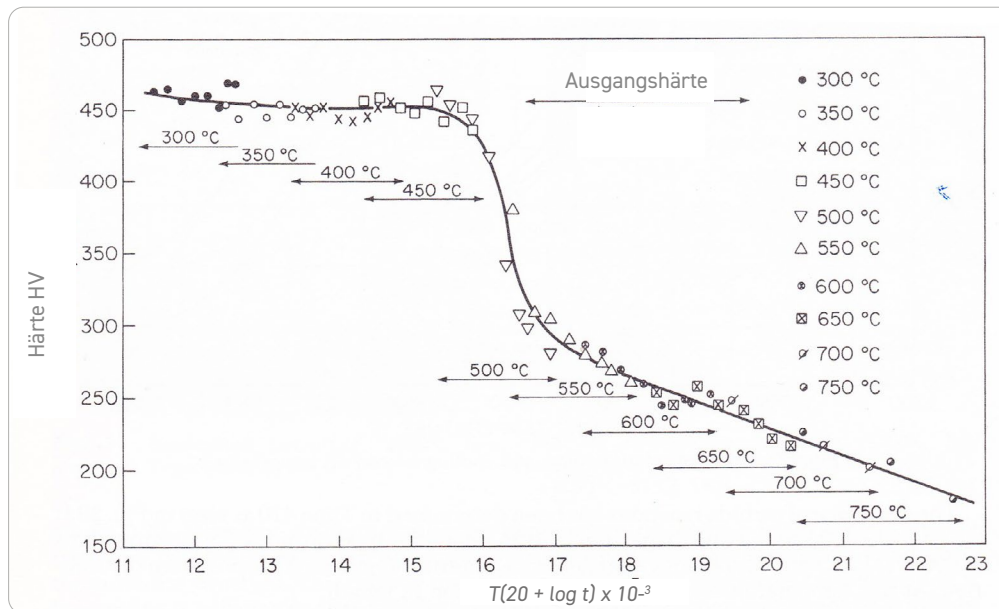


Abb. 7 Einfluss des Anlassens auf die Härte (HV) bei einem nichtrostenden Stahl mit 0,14 % C und 12 % Cr (T: Temperatur in K, t: Zeit in Stunden; 22)

Ausscheidungshärten

Im Unterschied zu martensitischen nichtrostenden Stählen, die nach der Abschreckung aus hohen Temperaturen eine Anlassbehandlung erfordern, benötigen ausscheidungshärtende nichtrostende Stähle wie AISI 630 (17-4PH), ausgehend vom lösungsgeglühten Zustand, lediglich eine einfache härtende Wärmebehandlung bei niedriger Temperatur. Diese Härtebehandlung erfolgt bei so niedrigen Temperaturen, dass kein nennenswerter Verzug und allenfalls oberflächliche Verfärbungen auftreten. Letztere können mechanisch oder durch Elektropolieren bzw. eine kurze Beizbehandlung mühelos entfernt werden. Die Wärmebehandlung führt bei diesen Sorten zu geringen, aber berechenbaren Abmessungsänderungen.

Durch Variation der Temperatur zwischen 480 °C und 620 °C sowie der Zeit zwischen einer und vier Stunden kann bei der Härtebehandlung ein breites Spektrum von Eigenschaften erzielt werden, wie in **Tabelle 6** dargestellt. Der Name der Wärmebehandlung, z.B. H900, ergibt sich aus der Haltetemperatur in °F. Zu beachten ist, dass entgegen der Erwartung eine „Härtebehandlung“ bei höheren Temperaturen, z.B. H1150, die Härte gegenüber dem lösungsgeglühten Zustand vermindert.

Die europäischen Normen für die Wärmebehandlung dieser Sorten sind in den **Anhängen 9 und 10b** verzeichnet.



Wärme- behandlung	Härtung		Zug- festigkeit	0.2% -Dehngrenze	Bruchdehnung	Härte		Charpy-V
	Temp. °C	Zeit Std.	MPa*	MPa*	%*	Rockwell HRC*	Brinell HB*	J*
H900	480	1	1310	1170	10	40	388	-
H925	495	4	1170	1070	10	38	375	6,9
H1025	550	4	1070	1000	12	35	331	20
H1075	580	4	1000	860	13	32	311	27
H1100	595	4	965	795	14	31	302	34H1150
H1150	620	4	930	725	16	28	277	41

Tabelle 6 Werte aus ASTM A564M (nur für bestimmte Abmessungsbereiche gültig), Abschreckung in Luft

* Mindestwerte

Spanende Bearbeitung

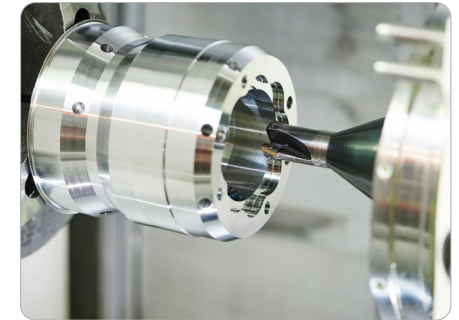
Die Verarbeitbarkeit ist stark von der Härte abhängig. Je härter der Werkstoff, desto schwieriger die Zerspanung. Sehr komplexe Bearbeitungsvorgänge, z.B. im Formenbau, werden daher oft am Werkstoff im lösungsgeglühten Zustand ausgeführt. Erst anschließend wird gehärtet. Demgegenüber wird Stabstahl z.B. für Ventilschäfte, Wellen usw. bevorzugt im gehärteten Zustand eingesetzt, weil diese nur eine geringfügige Nachbearbeitung erfordern.

Mit zunehmendem Kohlenstoffgehalt steigt die Härte. Jenseits eines Wertes von 30 HRC ist die Zerspanung sehr schwierig. Umfangreichere Bearbeitungen werden daher am geglühten Werkstoff ausgeführt.

Die Spanbarkeit lässt sich ebenfalls durch gezielte nichtmetallische Einschlüsse verbessern.

Sorten mit verbesserter Spanbarkeit z.B. mit Schwefelzusätzen (EN 1.4005/AISI 416, EN 1.4029/AISI 420F) enthalten MnS-Einschlüsse. Sie „schmieren“ die Grenzfläche zwischen Span und Schneidwerkzeug, wodurch sich Schneidkräfte und Werkzeugverschleiß vermindern. Diese Sorten sind seit langem marktgängig; ihre Grenzen sind allerdings bekannt:

- Die MnS-Einschlüsse setzen die Korrosionsbeständigkeit herab, was u.U. nicht akzeptabel ist.
- Die Einschlüsse können während des Walzens und der Wärmebehandlung zu Ausgangspunkten von Rissen werden. Das ist insbesondere bei Sorten mit Kohlenstoffgehalten über 0,25 % der Fall.



Gezielte Oxideinschlüsse haben inzwischen weithin Anerkennung gefunden. Bei der Stahlerzeugung führt eine „Kalziumbehandlung“ zu Oxiden mit vergleichsweise niedrigem Schmelzpunkt (wie beispielsweise die „Gehlenit“-Phase im ternären Al_2O_3 - SiO_2 - CaO -Diagramm), die an der Grenzfläche von Span und Werkzeug als Schmiermittel wirkt (vergleichbar mit geschmolzenem Glas). Die Temperatur, die erforderlich ist, um mit diesen Oxiden eine Schmierwirkung zu erzielen, ist höher als im Falle von Sulfiden.

Schweißen

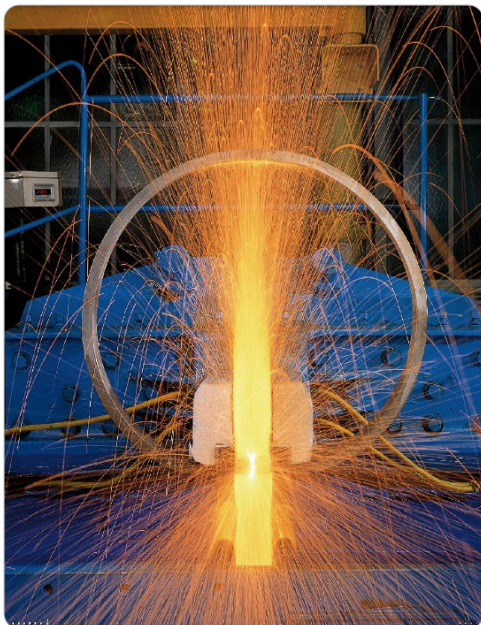
Das gebräuchlichste Schweißverfahren ist das elektrische Lichtbogenschweißen, obgleich auch andere Verfahren angewandt werden können (24,25).

Wenn die Schweißnähte ähnliche mechanische Eigenschaften aufweisen sollen wie der Grundwerkstoff, sollte der Chrom- und Kohlenstoffgehalt weitgehend übereinstimmen. Anderenfalls können auch die austenitischen Schweißzusatzwerkstoffe ER 308, ER 309 und ER 310 benutzt werden.

Martensitische nichtrostende Stähle wandeln sich beim Schweißen zu Austenit um. Gehärtet werden sie durch Martensitbildung bei der Abkühlung. Die Härte des Martensits ist unmittelbar vom Kohlenstoffgehalt abhängig. Je höher die Härte, desto stärker auch die Tendenz zu Heißrissbildung in der Schweißnaht selbst oder in der Wärmeeinflusszone während der Abkühlung nach dem Schweißvorgang.

Um diesem Risiko entgegenzuwirken, werden eine Vorwärmung sowie Zwischenlagen-Temperaturen von 200–300 °C empfohlen, sofern der Kohlenstoffgehalt 0,1 % übersteigt. Eine Wärmebehandlung im Anschluss an das Schweißen wird auf jeden Fall empfohlen, denn Stickstoff ist

ein starker Austenitbildner, der während der Erstarrung die Bildung von Deltaferrit in der Schmelzzone be- oder sogar verhindert. Ein geringer Deltaferritanteil trägt zur Vermeidung von Heißrissen bei, ohne die mechanischen Eigenschaften der Schweißnähte allzu sehr zu beeinträchtigen. Auf jeden Fall sind Schweißzusatzwerkstoffe und Schutzgase mit niedrigem Wasserstoffgehalt einzusetzen, damit es nicht zu wasserstoffinduzierter verzögerter Rissbildung kommt.



AISI-Sorte	EN	umhüllte Elektrode	TIG / MIG
410	1.4006	E 410	ER 410, ER 410NiMo
420	1.4028	E 410	E 410, E 420
431	1.4057	E 410	E 410
440 A/B/C	1.4125	nicht empfohlen	nicht empfohlen
630 (17-4PH) und 15-5PH	1.4542	E630 oder AMS 5827B	AMS 5826

Tabelle 7 Empfohlene Schweißzusatzwerkstoffe

Die Sorten EN 1.4313 (AISI 415), EN 1.4418 (AISI S165M) und EN 1.4542 (AISI 630), die allesamt niedrige Kohlenstoffgehalte aufweisen, sind bei Verarbeitern sehr beliebt, da sie sich leichter schweißen lassen als Edelbaustähle oder martensitische Standardstähle.

Detaillierte allgemeingültige Empfehlungen auszusprechen, ist nicht möglich, denn sie sind abhängig von

- Bauteildicke und Flanschstärke,
- evtl. metallischen Mischverbindungen,
- den Eigenschaftsanforderungen an die Schweißnähte,
- den Möglichkeiten der Wärmebehandlung der Fügebauteile bzw. des gesamten Werkstücks vor oder nach dem Schweißen,
- den Schweißzusatzwerkstoffen: (a) keine, (b) artgleich, (c) artverschieden.

Stahlhersteller und Lieferanten von Schweißzusatzwerkstoffen stehen den Verarbeitern mit Hinweisen zur Verfügung, wie optimale Ergebnisse erzielt werden.



10 Schrifttum

1. D. Peckner and I.M. Berstein: "Handbook of stainless steels", McGraw Hill Publisher, 1977, Chapter 6.
2. P. Lacombe, B. Baroux, G. Beranger: "Les Aciers inoxydables", Editions de Physique, 1990, Chapitre 13.
3. National Physical Laboratory guides to good practice in corrosion control: "Stress corrosion cracking", (2000), general on SCC
4. Craig and L. Smith: "Corrosion Resistant Alloys in the oil and gas industry –selection guidelines update", Nickel Institute Technical series N° 10 073 3rd edition, September 2011
5. A. Turnbull and A. Griffiths: "Corrosion and cracking of weldable 13% martensitic stainless steels – A review", National Physical Laboratory Teddington, UK, (2002) NPL Report MATC(A)108
6. M. Bartosinski, J.H. Magee, B. Friedrich: "Improving the chemical homogeneity of austenitic and martensitic stainless steels during nitrogen alloying in the pressure electro slag remelting (PESR) process",
http://www.metallurgie.rwth-aachen.de/old/images/pages/publikationen/aertosinski-mae_id_4297.pdf
7. S. Hamano, T. Shimizu, T. Noda: "Properties of Low Carbon High Nitrogen Martensitic Stainless Steels", Materials Science Forum, Vols. 539-543, pp. 4975-4980, 2007 (on PESR)
8. Roman Ritzenhoff and André Hahn: "Corrosion Resistance of High Nitrogen Steels", Corrosion Resistance, Dr Shih (Ed.), (2012), ISBN: 978-953-51-0467-4 InTech, Available from:
<http://www.intechopen.com/books/corrosion-resistance/corrosion-resistance-of-high-nitrogen-steels>
9. Surinder Singh, Tarun Nanda: "Effect of alloying and Heat Treatment on the Properties of Super Martensitic Stainless Steels", International Journal of Vol 1, October 2013, Engineering Technology and Scientific Research, p 6.
10. C.A.D. Rodrigues, P.L.D. Lorenzo, A. Solokwski, A. Barbosa and J.M.D.A. Rollo: "Development of a supermartensitic stainless steel microalloyed with Niobium", J. of ASTM International, Vol 3, N° 5, (2006)
11. D. A. Baudouin, D.K. Barbin and J. Skogsberg: "Experience with 13Cr for mitigating CO2 corrosion in the oilfield. Case histories: The gulf of Mexico and inland gas wells", Corrosion 95, Paper n°639 (1995).
12. M.A. Müller: "Martensitic Stainless Steels - A hidden champion?", International Stainless & Special Steel Summit, 2015 Vienna
13. B. Baroux, Ph. Maitrepierre and B. Thomas: "Mechanism of intergranular brittleness in martensitic stainless steels containing 13% Chromium", Göteborg, 1984.
14. D. Girodin, L. Manes, J-Y. Moraux, J-M. de Monicault: "Characterisation of the XD15N High Nitrogen Martensitic Stainless Steel for Aerospace Bearing", 4th International conference on Launcher Technology, 3-6 December 2002, Liège, Belgium
15. F. Zimmermann: "Nitrogen-alloyed martensitic steel", N stainless replaces 440C
16. B. Hahn, W. Bendick: "Pipe steels for modern high-output power plants", Vallourec & Voestalpine-Böhler Welding publication
17. Hwa-Teng Lee, Feng-Ming Liu and Wun-Hsin Hou: "Application and characteristics of low-carbon martensitic stainless steels on turbine blades", Materials Transactions, 56, N°4, (2015) 563-569
<https://www.jim.or.jp/journal/e/pdf3/56/04/563.pdf>



18. F. Abe: "Effect of Boron on Microstructure and Creep Strength of Advanced Ferritic Power lant Steels", *Procedia Engineering* 10 (2011), 94–99.
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705811002062>
19. P. Ernst: "Effect of boron on the mechanical properties of modified 12%Cr stainless steels", Doctoral thesis Swiss Federal Institute of Technology, Zurich, 1988
<http://e-collection.library.ethz.ch/eserv/eth:37464/eth-37464-02.pdf>
20. Kloeh RL, Harries DR: "High Chromium Ferritic and Martensitic Steels for Nuclear Applications", ASTM publication (2001)
https://www.astm.org/DIGITAL_LIBRARY/MNL/SOURCE_PAGES/MONO3.htm
21. J. Dossett and G.E. Totten: "Heat treating of martensitic stainless steels", ASM Handbook, vol 4D, Heat treating of Irons and Steels.
22. K.J. Irvine, D.J. Crowe and F.B. Pichering: "The physical metallurgy of 12% chromium steel", *J. Iron Steel Inst. London*, Vol 195, (1960), p 386
23. Capdevila, F.G. Caballero and C. Garcia de Andres: "Determination of Ms Temperature in Steels. A Bayesian neural network model", Dept of Physical Metallurgy, CENIM, Spain (2002)
24. P.J. Cunat: "The welding of Stainless Steels", Euro-Inox publication
http://www.worldstainless.org/Files/issf/non-image-files/PDF/Euro_Inox/BrochureWeldability_EN.pdf
25. The Nickel Institute: "Welding of Stainless steels and other joining Methods"
https://nickelinstitute.org/media/4655/ni_aisi_9002_weldingotherjoining.pdf
26. K.H. Lao, S.H. Shek, J.K.L. Lai: "Recent developments in Stainless Steels", *Materials Science and Engineering R* 65 (2009) 39-104
<https://www.tib.eu/de/>

Publikationen der Informationsstelle Edelstahl Rostfrei

Merkblatt 803:	Was ist nichtrostender Stahl?
Merkblatt 821:	Edelstahl Rostfrei – Eigenschaften
Merkblatt 822:	Die Verarbeitung von Edelstahl Rostfrei
Merkblatt 823:	Schweißen von Edelstahl Rostfrei
Merkblatt 824:	Die Reinigung von Edelstahl Rostfrei
Merkblatt 827:	Magnetische Eigenschaften nichtrostender Stähle
Merkblatt 828:	Korrosionsbeständigkeit nichtrostender Stähle an der Atmosphäre
Merkblatt 829:	Edelstahl Rostfrei in Kontakt mit anderen Werkstoffen
Merkblatt 833:	Edelstahl Rostfrei in Erdböden
Dokumentation 861:	Bauen mit Edelstahl Rostfrei
Sonderdruck 862:	Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-30.3-6 vom 5. März 2018 „Erzeugnisse, Bauteile und Verbindungsmittel aus nichtrostenden Stählen“
Merkblatt 866:	Nichtrostender Betonstahl
Merkblatt 980:	Nichtrostende Flachprodukte für das Bauwesen – Erläuterungen zu den Sorten der EN 10088-4
Merkblatt 982:	Oberflächenhärten nichtrostender Stähle
Merkblatt 986:	Visuelle Beurteilung von Schweißnähten bei nichtrostendem Stahl - ein bebildeter Leitfaden
Merkblatt 987:	Nichtrostende und hitzebeständige Stähle bei hohen Temperaturen

Diese und zahlreiche weitere ISER-Publikationen stehen im Internet unter www.edelstahl-rostfrei.de zum kostenfreien Download zur Verfügung.



11 Anhänge

Anhang 1: EN-Normen zu martensitischen nichtrostenden Stählen

Allgemein

- DIN EN 10088-1:2014-12
Nichtrostende Stähle - Teil 1: Verzeichnis der nichtrostenden Stähle
- ISO 15510:2014-05
Nichtrostende Stähle - Chemische Zusammensetzung
- DIN EN 10088-2:2014-12
Nichtrostende Stähle - Teil 2: Technische Lieferbedingungen für Blech und Band aus korrosionsbeständigen Stählen für allgemeine Verwendung
- DIN EN 10302:2008-06
Warmfeste Stähle, Nickel- und Cobaltlegierungen

Flachprodukte

- DIN EN 10088-2:2014-12
Nichtrostende Stähle - Teil 2: Technische Lieferbedingungen für Blech und Band aus korrosionsbeständigen Stählen für allgemeine Verwendung
- DIN EN 10088-4:2010-01
Nichtrostende Stähle - Teil 4: Technische Lieferbedingungen für Blech und Band aus korrosionsbeständigen Stählen für das Bauwesen
- DIN EN 10151:2003-02
Federband aus nichtrostenden Stählen - Technische Lieferbedingungen

Langprodukte

- DIN EN 10088-3:2014-12
Nichtrostende Stähle - Teil 3: Technische Lieferbedingungen für Halbzeug, Stäbe, Walzdraht, gezogenen Draht, Profile und Blankstahlerzeugnisse aus korrosionsbeständigen Stählen für allgemeine Verwendung
- DIN EN 10088-5:2009-07
Nichtrostende Stähle - Teil 5: Technische Lieferbedingungen für Stäbe, Walzdraht, gezogenen Draht, Profile und Blankstahlerzeugnisse aus korrosionsbeständigen Stählen für das Bauwesen
- UNE EN 10270-3:2012-01
Steel wire for mechanical springs - Part 3: Stainless spring steel wire
- DIN EN 10264-4:2012-03
Stahldraht und Drahterzeugnisse - Stahldraht für Seile - Teil 4: Draht aus nichtrostendem Stahl
- DIN EN 10263-5:2018-02
Walzdraht, Stäbe und Draht aus Kaltstauch- und Kaltfließpressstählen - Teil 5: Technische Lieferbedingungen für nichtrostende Stähle
- DIN EN 10090:1998-03
Ventilstähle und -legierungen für Verbrennungskraftmaschinen
- DIN EN ISO 7153-1:2017-02
Chirurgische Instrumente - Werkstoffe - Teil 1: Metalle



Rohre

- DIN EN 10312:2005-12
Geschweißte Rohre aus nichtrostendem Stahl für den Transport von Wasser und anderen wässrigen Flüssigkeiten - Technische Lieferbedingungen
- DIN EN 10296-2:2006-02
Geschweißte kreisförmige Stahlrohre für den Maschinenbau und allgemeine technische Anwendungen - Technische Lieferbedingungen - Teil 2: Nichtrostende Stähle
- DIN EN 10297-2:2006-02
Nahtlose kreisförmige Stahlrohre für den Maschinenbau und allgemeine technische Anwendungen - Technische Lieferbedingungen - Teil 2: Rohre aus nichtrostenden Stählen
- DIN EN ISO 9626:2016-12
Kanülenrohre aus nichtrostendem Stahl zur Herstellung von Medizinprodukten - Anforderungen und Prüfverfahren

Schmiedestücke

- DIN EN 10250-2:2020-11 - Entwurf
Freiformschmiedestücke aus Stahl für allgemeine Verwendung - Teil 2: Unlegierte Qualitäts- und Edelmehle

Stahlguss

- DIN EN 10283:2019-06
Korrosionsbeständiger Stahlguss
- DIN EN 10293:2015-04
Stahlguss - Stahlguss für allgemeine Anwendungen

Befestigungselemente:

- DIN EN 10269:2014-02
Stähle und Nickellegierungen für Befestigungselemente für den Einsatz bei erhöhten und/oder tiefen Temperaturen
- DIN EN ISO 3506
Mechanische Verbindungselemente - Mechanische Eigenschaften von Verbindungselementen aus korrosionsbeständigen nichtrostenden Stählen



Anhang 2: Amerikanische Normen zu martensitischen nichtrostenden Stählen

Allgemein

- *ASTM A480 / A480M - 16a: Standard Specification for General Requirements for Flat-Rolled Stainless and Heat-Resisting Steel Plate, Sheet, and Strip
- ASTM A484 / A484M - 16: Standard Specification for General Requirements for Stainless Steel Bars, Billets, and Forgings
- ASTM A555 / A555M - 16 : Standard Specification for General Requirements for Stainless Steel Wire and Wire Rods
- ASTM A959 - 11: Standard Guide for Specifying Harmonized Standard Grade Compositions for Wrought Stainless Steels
- ASTM A999 / A999M - 15 : Standard Specification for General Requirements for Alloy and Stainless Steel Pipe
- ASTM A1016 / A1016M - 14: Standard Specification for General Requirements for Ferritic Alloy Steel, Austenitic Alloy Steel, and Stainless Steel Tubes

Flachprodukte

- *ASTM A240 / A240M - 16 : Standard Specification for Chromium and Chromium-Nickel Stainless Steel Plate, Sheet, and Strip for Pressure Vessels and for General Applications
- ASTM A666 - 15: Standard Specification for Annealed or Cold-Worked Austenitic Stainless Steel Sheet, Strip, Plate, and Flat Bar
- ASTM A693 - 13: Standard Specification for Precipitation-Hardening Stainless and Heat-Resisting Steel Plate, Sheet, and Strip

Langprodukte

- *ASTM A276 / A276M - 16a : Standard Specification for Stainless Steel Bars and Shapes
- ASTM A314 - 15: Standard Specification for Stainless Steel Billets and Bars for Forging
- ASTM A493 - 16: Standard Specification for Stainless Steel Wire and Wire Rods for Cold Heading and Cold Forging
- ASTM A564 / A564M - 13 : Standard Specification for Hot-Rolled and Cold-Finished Age-Hardening Stainless Steel Bars and Shapes
- ASTM A565 / A565M: Standard Specification for Martensitic Stainless Steel Bars for High-Temperature Service
- ASTM A582 / A582M - 12e1: Standard Specification for Free-Machining Stainless Steel Bars

Rohre

- ASTM A182 / A182M - 16: Standard Specification for Forged or Rolled Alloy and Stainless Steel Pipe Flanges, Forged Fittings, and Valves and Parts for High-Temperature Service
- ASTM A268 / A268M - 10: Standard Specification for Seamless and Welded Ferritic and Martensitic Stainless Steel Tubing for General Service
- ASTM A511 / A511M - 16 : Standard Specification for Seamless Stainless Steel Mechanical Tubing and Hollow Bar
- ASTM A554 - 16 : Standard Specification for Welded Stainless Steel Mechanical Tubing



Schmiede- und Gussstücke

- ASTM A473 – 16: Standard Specification for Stainless Steel Forgings
- ASTM A743 / A743M - 13ae1 : Standard Specification for Castings, Iron-Chromium, Iron-Chromium-Nickel, Corrosion Resistant, for General Application
- ASTM A487 / A487M – 14 Standard Specification for Steel Castings Suitable for Pressure Service

Befestigungselemente

- ASTM F593 - 13a: Standard Specification for Stainless Steel Bolts, Hex Cap Screws, and Studs
- ASTM F594 - 09(2015) : Standard Specification for Stainless Steel Nuts
- ASTM F836M - 16 : Standard Specification for Style 1 Stainless Steel Metric Nuts (Metric)

Anhang 3: Analysen der gebräuchlichen Sorten gemäß DIN EN 10088-1: 2014-12



Stahlbezeichnung		Masse-%										
EN-Kurzname	EN-Werkstoffnummer	C	Si max.	Mn	P max.	S	Cr	Cu	Mo	Nb	Ni	Andere
X12Cr13	1.4406	0,08 bis 0,15	1,00	≤1,50	0,040	≤0,015	11,5 bis 13,5	-	-	-	≤0,75	-
X12CrS13	1.4005	0,08 bis 0,15	1,00	≤1,50	0,040	0,15 bis 0,35	12,0 bis 14,0	-	≤0,60	-	-	-
X15Cr13	1.4024	0,12 bis 0,17	1,00	≤1,00	0,040	≤0,015	12,0 bis 14,0	-	-	-	-	-
X20Cr13	1.4021	0,16 bis 0,25	1,00	≤1,50	0,040	≤0,015	12,0 bis 14,0	-	-	-	-	-
X30Cr13	1.4028	0,26 bis 0,35	1,00	≤1,50	0,040	≤0,015	12,0 bis 14,0	-	-	-	-	-
X29CrS13	1.4029	0,25 bis 0,32	1,00	≤1,50	0,040	0,15 bis 0,25	12,0 bis 13,5	-	≤0,60	-	-	-
X39Cr13	1.4031	0,36 bis 0,42	1,00	≤1,00	0,040	≤0,015	12,5 bis 14,5	-	-	-	-	-
X46Cr13	1.4034	0,43 bis 0,50	1,00	≤1,00	0,040	≤0,015	12,5 bis 14,5	-	-	-	-	-
X46CrS13	1.4035	0,43 bis 0,50	1,00	≤2,00	0,040	0,15 bis 0,35	12,5 bis 14,0	-	-	-	-	-
X38CrMo14	1.4419	0,36 bis 0,42	1,00	≤1,00	0,040	≤0,015	13,0 bis 14,5	-	0,60 bis 1,00	-	-	-
X55CrMo14	1.4110	0,48 bis 0,60	1,00	≤1,00	0,040	≤0,015	13,0 bis 15,0	-	0,50 bis 0,80	-	-	V: ≤0,15
X50CrMoV15	1.4116	0,45 bis 0,55	1,00	≤1,00	0,040	≤0,015	14,0 bis 15,0	-	0,50 bis 0,80	-	-	V: 0,10 bis 0,20
X70CrMo15	1.4109	0,60 bis 0,75	0,70	≤1,00	0,040	≤0,015	14,0 bis 16,0	-	0,40 bis 0,80	-	-	-
X40CrMoVN16-2	1.4123	0,35 bis 0,50	1,00	≤1,00	0,040	≤0,015	14,0 bis 16,0	-	1,00 bis 2,50	-	≤0,50	V: ≤1,50 N: 0,10 bis 0,30
X14CrMoS17	1.4104	0,10 bis 0,17	1,00	≤1,50	0,040	0,15 bis 0,35	15,5 bis 17,5	-	0,20 bis 0,60	-	-	-
X39CrMo17-1	1.4122	0,33 bis 0,45	1,00	≤1,50	0,040	≤0,015	15,5 bis 17,5	-	0,80 bis 1,30	-	≤1,00	-
X105CrMo17	1.4125	0,95 bis 1,20	1,00	≤1,00	0,040	≤0,015	16,0 bis 18,0	-	0,40 bis 0,80	-	-	-
X90CrMoV18	1.4112	0,85 bis 0,95	1,00	≤1,00	0,040	≤0,015	17,0 bis 19,0	-	0,90 bis 1,30	-	-	V: 0,07 bis 0,12
X17CrNi16-2	1.4057	0,12 bis 0,22	1,00	≤1,50	0,040	≤0,015	15,0 bis 17,0	-	-	-	1,50 bis 2,50	-
X1CrNiMoCu12-5-2	1.4422	≤0,020	0,50	≤2,00	0,040	≤0,003	11,0 bis 13,0	0,20 bis 0,80	1,30 bis 1,80	-	4,0 bis 5,0	N: ≤0,020



Stahlbezeichnung		Masse-%										
EN-Kurzname	EN-Werkstoffnummer	C	Si max.	Mn	P max.	S	Cr	Cu	Mo	Nb	Ni	Andere
X1CrNiMoCu12-7-3	1.4423	≤0,020	0,50	≤2,00	0,040	≤0,003	11,0 bis 13,0	0,20 bis 0,80	2,30 bis 2,80	-	6,0 bis 7,0	N: ≤0,020
X2CrNiMoV13-5-2	1.4415	≤0,030	0,50	≤0,50	0,040	≤0,015	11,5 bis 13,5	-	1,50 bis 2,50	-	4,5 bis 6,5	Ti: ≤0,010 V: 0,10 bis 0,50
X3CrNiMo13-4	1.4313	≤0,05	0,70	≤1,50	0,040	≤0,015	12,0 bis 14,0	-	0,30 bis 0,70	-	3,5 bis 4,5	N: ≥0,020
X4CrNiMo16-5-1	1.4418	≤0,06	0,70	≤1,50	0,040	≤0,015	15,0 bis 17,0	-	0,80 bis 1,50	-	4,0 bis 6,0	N: ≥0,020
X1CrNiMoAlTi2-9-2	1.4530	≤0,015	0,10	≤0,10	0,010	≤0,005	11,5 bis 12,5	-	1,85 bis 2,15	-	8,5 bis 9,5	Al: 0,60 bis 0,80 Ti: 0,28 bis 0,37 N: ≤0,010
X1CrNiMoAlTi12-10-2	1.4596	≤0,015	0,10	≤0,10	0,010	≤0,005	11,5 bis 12,5	-	1,85 bis 2,15	-	9,2 bis 10,2	Al: 0,80 bis 1,10 Ti: 0,28 bis 0,40 N: ≤0,020
X5CrNiCuNb16-4	1.4542	≤0,07	0,70	≤1,50	0,040	≤0,015	15,0 bis 17,0	3,0 bis 5,0	≤0,60	5xC bis 0,45	3,0 bis 5,0	-



Anhang 4: Analysen der warmfesten Standardsorten gemäß DIN EN 10302:2008-06

Stahlbezeichnung		Masse-%														
EN-Kurzname	EN-Werkstoffnummer	C	Si	Mn	P max	S max	N	Al	Cr	Mo	Nb	Ni	Ti	V	W	Andere
Martensitische nichtrostende Stähle																
X10CrMoVNb9-1	1.4903	0,06 bis 0,12	≤0,50	0,30 bis 0,60	0,025	0,015	0,030 bis 0,070	≤0,030	8,0 bis 9,5	0,85 bis 1,05	0,060 bis 0,10	≤0,40	-	0,18 bis 0,25	-	-
X11CrMoWVNb9-1-1	1.4905	0,09 bis 0,13	0,10 bis 0,50	0,30 bis 0,60	0,020	0,010	0,050 bis 0,090	≤0,040	8,5 bis 9,5	0,90 bis 1,10	0,060 bis 0,10	0,10 bis 0,40	-	0,18 bis 0,25	0,90 bis 1,10	B: 0,0005 bis 0,0090
X8CrCoNiMo10-6	1.4911	0,05 bis 0,12	0,10 bis 0,80	0,30 bis 1,30	0,025	0,015	≤0,035	-	9,8 bis 11,2	0,50 bis 1,00	0,20 bis 0,50	0,20 bis 1,20	-	0,10 bis 0,40	≤0,70	B: 0,0005 bis 0,015 Co: 5,00 bis 7,00
X19CrMoNbVN11-1	1.4913	0,17 bis 0,23	≤0,50	0,40 bis 0,90	0,025	0,015	0,050 bis 0,10	≤0,020	10,0 bis 11,5	0,50 bis 0,80	0,25 bis 0,55	0,20 bis 0,60	-	0,10 bis 0,30	-	B: ≤0,0015
X20CrMoV11-1	1.4922	0,17 bis 0,23	≤0,50	≤1,00	0,025	0,015	-	-	10,0 bis 12,5	0,80 bis 1,20	-	0,30 bis 0,80	-	0,25 bis 0,35	-	-
X22CrMoV12-1	1.4923	0,18 bis 0,24	≤0,50	0,40 bis 0,90	0,025	0,015	-	-	11,0 bis 12,5	0,80 bis 1,20	-	0,30 bis 0,80	-	0,25 bis 0,35	-	-
X20CrMoWV12-1	1.4935	0,17 bis 0,24	0,10 bis 0,50	0,30 bis 0,80	0,025	0,015	-	-	11,0 bis 12,5	0,80 bis 1,20	-	0,30 bis 0,80	-	0,20 bis 0,35	0,40 bis 0,50	-
X12CrNiMoV12-3	1.4938	0,08 bis 0,15	≤0,50	0,40 bis 0,90	0,025	0,015	0,020 bis 0,040	-	11,0 bis 12,5	1,50 bis 2,00	-	2,00 bis 3,00	-	0,25 bis 0,40	-	-



Anhang 5: Analysen der gebräuchlichen Standardsorten gemäß ASTM/AISI

UNS-Bezeichnung	Typ	Masse-%									
		Kohlenstoff	Mangan	Phosphor	Schwefel	Silizium	Chrom	Nickel	Molybdän	Stickstoff	Andere
S40300	403	0,15	1,00	0,040	0,030	0,50	11,5-13,0	-	-	-	-
S41000	410	0,08-0,15	1,00	0,040	0,030	1,00	11,5-13,5	-	-	-	-
S41040	XM-30	0,18	1,00	0,040	0,030	1,00	11,0-13,0	-	-	-	Nb 0,05-0,30
S41400	414	0,15	1,00	0,040	0,030	1,00	11,5-13,5	1,25-2,50	-	-	-
S41425	-	0,05	0,50-1,00	0,020	0,005	0,50	12,0-15,0	4,0-7,0	1,50-2,00	0,06-0,12	Cu 0,30
S41500	-	0,05	0,50-1,00	0,030	0,030	0,60	11,5-14,0	3,5-5,5	0,50-1,00	-	-
S42000	420	min. 0,15	1,00	0,040	0,030	1,00	12,0-14,0	-	-	-	-
S42010	-	0,15-0,30	1,00	0,040	0,030	1,00	13,5-15,0	0,35-0,85	0,40-0,85	-	-
S43100	431	0,20	1,00	0,040	0,030	1,00	15,0-17,0	1,25-2,50	-	-	-
S44002	440A	0,60-0,75	1,00	0,040	0,030	1,00	16,0-18,0	-	0,75	-	-
S44003	440B	0,75-0,95	1,00	0,040	0,030	1,00	16,0-18,0	-	0,75	-	-
S44004	440C	0,95-1,20	1,00	0,040	0,030	1,00	16,0-18,0	-	0,75	-	-



Anhang 6: Sorten-Entsprechungen bei martensitischen nichtrostenden Stählen

Typ	ISO-Name	ISO-Bezeichnung	EN	UNS	AISI	JIS	GB
M	4119-410-92-C	X13CrMo13	1.4119			SUS410J1	S45710
M	4024-410-09-E	X15Cr13	1.4024			SUS410	
M	4006-410-00-I	X12Cr13	1.4006	S41000	410	SUS410	S41010
M	4415-415-92-E	X2CrNiMoV13-5-2	1.4415				
M	4313-415-00-I	X3CrNiMo13-4	1.4313	S41500		SUSF6NM	S41595
M	4642-416-72-J	X13CrPb13	1.4642			SUS410F2	
M	4005-416-00-I	X12CrS13	1.4005	S41600	416	SUS416	S41617
M	4038-420-00-I	X52Cr13	1.4038	S42000			
M	4039-420-09-I	X60Cr13	1.4039				
M	4419-420-97-E	X38CrMo14	1.4419				S35830
M	4110-420-69-E	X55CrMo14	1.4110				
M	4116-420-77-E	X50CrMoV15	1.4116				
M	4035-420-74-E	X46CrS13	1.4035				
M	4034-420-00-I	X46Cr13	1.4034	S42000			S42040
M	4643-420-72-J	X33CrPb13	1.4643			SUS420F2	
M	4029-420-20-I	X33CrS13	1.4029	S42020	420F	SUS420F	S42037
M	4031-420-00-I	X39Cr13	1.4031	S42000	420		S42040
M	4028-420-00-I	X30Cr13	1.4028	S42000	420	SUS420J2	S42030
M	4021-420-00-I	X20Cr13	1.4021	S42000	402	SUS420J1	S42020
M	4923-422-77-E	X22CrMoNiV12-1	1.4923				
M	4929-422-00-I	X23CrMoWMnNiV12-1-1	1.4929	S42200	422	SUH616	S47220
M	4058-429-99-J	X33Cr16	1.4058			SUS429J1	
M	4019-430-20-I	X14CrS17	1.4019, 1.4104	S43020	430F		S11717



Typ	ISO-Name	ISO-Bezeichnung	EN	UNS	AISI	JIS	GB
M	4418-431-77-E	X4CrNiMo16-5-1	1.4418				
M	4123-431-77-E	X40CrMoVN16-2	1.4123				
M	4057-431-00-X	X17CrNi16-2	1.4057	S43100	431	SUS431	S43120
M	4122-434-09-I	X39CrMo17-1	1.4122				
M	4766-440-77-X	X80CrSiNi20-2	1.4766			SUH4	S48380
M	4025-440-74-J	X110CrS17	1.4025		"440F"	SUS440F	S44097
M	4023-440-04-I	X110Cr17	1.4023	S44004	440C	SUS440C	S44096
M	4041-440-03-X	X85Cr17	1.4041	S44003	440B	SUS440B	S44080
M	4040-440-02-X	X68Cr17	1.4040	S44002	440A	SUS440A	S44070
M	4916-600-77-J	X18CrMnMoNbVN12	1.4916			SUH600	S46250
M-PH	4534-138-00-X	X3CrNiMoAl13-8-3	1.4534	S13800			S51380
M-PH	4594-155-92-E	X5CrNiMoCuNb14-5	1.4594				
M-PH	4532-157-00-I	X8CrNiMoAl15-7-2	1.4532	S15700			
M-PH	4542-174-00-I	X5CrNiCuNb16-4	1.4542	S17400	"630"	SUS630	S51740
M-PH	4568-177-00-I	X7CrNiAl17-7	1.4568	S17700	"631"	SUS631	S51700
M-PH	4457-350-00-X	X9CrNiMoN17-5-3	1.4457	S35000			S51750
M-PH	4530-455-77-E	X1CrNiMoAlTi12-9-2	1.4530				
M-PH	4596-455-77-E	X1CrNiMoAlTi12-10-2	1.4596				
M-PH	4645-469-10-U	X2CrNiMoCu AlTi12-9-4-3	1.4645	S46910			
M-PH	4644-662-20-U	X4NiCrMoTiMnSiB26-14-3-2	1.4644	S66220			



Anhang 7: Physikalische Eigenschaften martensitischer nichtrostender Stähle (DIN EN 10088-1:2014-12)

Stahlbezeichnung		spezifisches Gewicht kg/dm ³	Elastizitätsmodul bei					Mittlerer Wärmeausdehnungskoeffizient zwischen 20 °C und				Wärmeleitfähigkeit bei 20°C $\frac{W}{m \cdot K}$	spezifische Wärmekapazität bei 20°C $\frac{J}{kg \cdot K}$	elektrischer Widerstand bei 20°C $\frac{\Omega \cdot mm^2}{m}$	magnetisierbar
EN-Kurzname	EN-Werkstoffnummer		20°C	100°C	200°C	300°C	400°C	100°C	200°C	300°C	400°C				
			GPa												
X12Cr13	1.4006	7,7	215	212	205	200	190	10,5	11,0	11,5	12,0	30	460	0,60	ja
X12CrS13	1.4005	7,7	215	212	205	200	190	10,5	11,0	11,5	12,0	30	460	0,60	
X15Cr13	1.4024	7,7	216	213	207	200	192	10,5	11,0	11,5	12,0	30	460	0,60	
X20Cr13	1.4021	7,7	215	212	205	200	190	10,5	11,0	11,5	12,0	30	460	0,60	
X30Cr13	1.4028	7,7	215	212	205	200	190	10,5	11,0	11,5	12,0	30	460	0,65	
X29CrS13	1.4029	7,7	215	212	205	200	190	10,5	-	11,5	-	30	460	0,55	
X39Cr13	1.4031	7,7	215	212	205	200	190	10,5	11,0	11,5	12,0	30	460	0,55	
X46Cr13	1.4034	7,7	215	212	205	200	190	10,5	11,0	11,5	12,0	30	460	0,55	
X46CrS13	1.4035	7,7	215	212	205	200	190	10,5	11,0	11,5	12,0	30	460	0,55	
X38CrMo14	1.4419	7,7	215	212	205	200	190	10,5	11,0	11,5	12,0	30	460	0,62	
X55CrMo14	1.4110	7,7	215	212	205	200	190	10,5	11,0	11,5	12,0	30	460	0,62	
X50CrMoV15	1.4116	7,7	215	212	205	200	190	10,5	11,0	11,0	11,5	30	460	0,65	
X70CrMo15	1.4109	7,7	215	212	205	200	190	10,5	11,0	11,0	11,5	30	460	0,65	
X40CrMoVN16-2	1.4123	7,7	195	199	192	177	-	10,4	10,6	10,8	11,1	24	430	0,90	
X14CrMoS17	1.4104	7,7	215	212	205	200	190	10,0	10,5	10,5	10,5	25	400	0,70	
X39CrMo17-1	1.4122	7,7	215	212	205	200	190	10,4	10,8	11,2	11,5	15	430	0,80	
X105CrMo17	1.4125	7,7	215	212	205	200	190	10,4	10,8	11,2	11,5	15	430	0,90	
X90CrMoV18	1.4112	7,7	215	212	205	200	190	10,4	10,8	11,2	11,5	15	430	0,80	
X17CrNi16-2	1.4057	7,7	215	212	205	200	190	10,0	10,5	10,5	10,5	25	460	0,70	
X1CrNiMoCu12-5-2	1.4122	7,7	200	195	165	175	170	10,4	10,8	11,2	11,5	16	450	0,75	



Stahlbezeichnung		spezifisches Gewicht	Elastizitätsmodul bei					Mittlerer Wärmeausdehnungskoeffizient zwischen 20 °C und				Wärmeleitfähigkeit bei 20°C	spezifische Wärmekapazität bei 20°C	elektrischer Widerstand bei 20°C	magnetisierbar
EN-Kurzname	EN-Werkstoffnummer		kg/dm ³	20°C	100°C	200°C	300°C	400°C	100°C	200°C	300°C				
				GPa					10 ⁻⁴ x K ⁻¹				W ----- m * K	J ----- kg * K	Ω * mm ² ----- m
X1CrNiMoCu12-7-3	1.4423	7,7	200	195	185	175	170	10,4	10,8	11,2	11,5	16	450	0,75	ja
X2CrNiMoV13-5-2	1.4415	7,8	200	195	185	175	170	10,9	-	11,1	-	16	500	0,71	
X3CrNiMo13-4	1.4313	7,7	200	195	185	175	170	10,5	10,9	11,3	11,5	25	430	0,60	
X4CrNiMo16-5-1	1.4418	7,7	200	195	185	175	170	10,3	10,8	11,2	11,5	15	430	0,80	
X1CrNiMoAlTi12-9-2	1.4530	7,7	195	187	178	171	-	10,0	10,3	10,7	11,2	16	500	0,71	
X1CrNiMoAlTi2-10-2	1.4596	7,7	195	187	178	171	-	10,0	10,3	10,7	11,2	16	500	0,71	
X5CrNiCuNb16-4	1.4542	7,8	200	195	185	175	170	10,9	-	11,1	-	16	500	0,71	
X7CrNiAl17-7	1.4506	7,8	200	195	185	175	170	13,0	13,5	14,0	-	16	500	0,80	
X5CrNiMoCuNb145	1.4594	7,8	200	195	185	175	170	10,9	-	11,1	-	16	500	0,71	nein
X5NiCrTiMoV925-15-2	1.4606	7,9	211	206	200	192	193	16,5	16,9	18,0	17,5	14	460	0,91	



Anhang 8: Martensitische nichtrostende Stähle in der Ölförderung

Normen (API, NACE, NORSOK u.a.) legen fest, welche Stähle und korrosionsbeständigen Legierungen unter bestimmten Bedingungen (H_2S , CO_2 , Chloride, pH und Temperatur) eingesetzt werden dürfen.

Einige maßgebliche Normen:

- DIN EN ISO 15156
Erdöl- und Erdgasindustrie - Werkstoffe für den Einsatz in H_2S -haltiger Umgebung bei der Öl- und Gasgewinnung
- API 5CRA
Specification for Corrosion-resistant Alloy Seamless Tubes for Use as Casing, Tubing, and Coupling Stock – Technical Delivery Conditions
- DIN EN ISO 13680:2020-11
Erdöl- und Erdgasindustrie - Nahtlose Rohre aus korrosionsbeständigen Legierungen zur Verwendung als Futter- oder Steigrohre sowie Muffenvorrohre und Zusatzmaterial - Technische Lieferbedingungen
- NORSOK-Standard M-001

Martensitische Stähle kommen zur Anwendung, wenn moderate Korrosionsbeständigkeit erforderlich ist, d.h. maximal 10 kPa H_2S , pH größer oder gleich 3,5 und Temperatur max. 90 °C. Da die Bedingungen (sulfidinduzierte) Spannungsrisskorrosion begünstigen, liegt hier einer der wenigen Fälle vor, in denen nur sehr niedrige mechanische Werte gefordert werden, d.h. eine maximale Härte von 22 HRC für alle Werkstoffe.



Anhang 9: Mechanische Eigenschaften bei Raumtemperatur einiger wärmebehandelter martensitischer nichtrostender Stähle aus DIN EN 10088-2:2014-1

EN-Kurzname	EN-Werkstoffnummer	Wärmebehandlung ¹⁾	Mindest-Dehngrenze, MPa	Zugfestigkeit, MPa	Bruchdehnung, min. %
Standardsorten					
X12Cr13	1.4006	A	-	≤730	-
		QT650	450	650-850	15
X12CrS13	1.4005	A	-	≤730	-
		QT650	450	650-850	12
X15Cr13	1.4024	A	-	≤730	-
		QT650	450	650-850	15
X20Cr13	1.4021	A	-	≤760	-
		QT700	500	700-850	13
		QT800	600	800-950	12
X30Cr13	1.4028	A	-	≤800	-
		QT850	650	850-1000	10
X39Cr13	1.4031	A	-	≤800	-
		QT800	650	800-1000	10
X46Cr13	1.4034	A	-	≤800	-
		QT800	650	800-1000	10
X17CrNi16-2	1.4057	A	-	≤950	-
		QT800	600	800-950	12
		QT900	700	900-1050	10
X38CrMo14	1.4419	A	-	≤760	-
X55CrMo14	1.4110	A	-	≤950	-
X3CrNiMo13-4	1.4313	A	-	≤1100	-
		QT700	520	700-850	15
		QT780	620	780-980	15
		QT900	800	900-1100	12

¹⁾ Querschnitt ≤160 mm, A: gegläht, QT: abgeschreckt und angelassen, AT: lösungsgeglüht, P: ausscheidungsgehärtet



EN-Kurzname	EN-Werkstoffnummer	Wärmebehandlung ¹⁾	Mindest-Dehngrenze, MPa	Zugfestigkeit, MPa	Bruchdehnung, min. %
X50CrMoV15	1.4116	A	-	≤900	-
X4CrNiMo16-5-1	1.4418	A	-	≤1100	-
		QT760	550	760-960	16
		QT900	700	900-1100	16
X14CrMoS17	1.4104	A	-	≤730	-
		QT650	500	650-850	10
X39CrMo1	1.4122	A	-	≤800	-
		QT750	550	750-950	10
X29CrS13	1.4029	A	-	≤800	-
		QT850	650	850-1000	9
X46CrS13	1.4035	A	-	≤800	-
X70CrMo15	1.4109	A	-	≤900	-
X2CrNiMoV13-5-2	1.4415	QT750	650	750-900	18
		QT850	750	850-1000	15
ausscheidungshärtende Sorte					
X5CrNiCuNb16-4	1.4542	AT	-	≤1200	-
		P800	520	800-950	18
		P930	720	930-1000	16
		P960	790	960-1160	12
		P1070	1000	1070-1270	10

¹⁾ Querschnitt ≤160 mm, A: gegläht, QT: abgeschreckt und angelassen, AT: lösungsgeglüht, P: ausscheidungsgehärtet

Anhang 10a: Empfohlene Wärmebehandlungen für martensitische nichtrostende Stähle gemäß DIN EN 10088-3^(a): 2014-12



Stahlbezeichnung		Warmumformung		Wärmebehandlungs-Symbol	Glühen		Abschrecken		Anlassen		
Werkstoffname	Werkstoffnummer	Temperatur °C	Art der Abkühlung		Temperatur (b) °C	Art der Abkühlung	Temperatur (b) °C	Art der Abkühlung	Temperatur °C		
Standardgüten											
X12Cr13	1.4006	1100 bis 800	Luft	+A	745 bis 825	Luft	-	-	-		
				+QT650	-	-	950 bis 1000	Öl, Luft	680 bis 780		
X12CrS13	1.4005			+A	745 bis 825	Luft	-	-	-		
				+QT650	-	-	950 bis 1000	Öl, Luft	680 bis 780		
X15Cr13	1.4024		langsame Abkühlung	Ofen, Luft	+A	750 bis 800	Ofen, Luft	-	-	-	
					+QT650	-	-	950 bis 1030	Öl, Luft	700 bis 750	
X20Cr13	1.4021					+A	745 bis 825	Luft	-	-	-
						+QT700	-	-	950 bis 1050	Öl, Luft	650 bis 750
						+QT800	-	-	950 bis 1050	Öl, Luft	600 bis 700
						+A	745 bis 825	Luft	-	-	-
X30Cr13	1.4028					+A	745 bis 825	Luft	-	-	-
						+QT850	-	-	950 bis 1050	Öl, Luft	625 bis 675
X39Cr13	1.4031					+A	750 bis 850	Ofen, Luft	-	-	-
						+QT800	-	-	950 bis 1050	Öl, Luft	650 bis 700
X46Cr13	1.4034					+A	750 bis 850	Ofen, Luft	-	-	-
						+QT850	-	-	950 bis 1050	Öl, Luft	650 bis 700
X17CrNi16-2	1.4057	1100 bis 800		langsame Abkühlung	+A (e)	680 bis 800	Ofen, Luft	-	-	-	
					+QT800 (d)	-	-	950 bis 1050	Öl, Luft	750 bis 800 + 650 bis 700 (d)	
					+QT900	-	-	950 bis 1050	Öl, Luft	600 bis 650	
X38CrMo14	1.4419				+A	750 bis 830	Ofen, Luft	-	-	-	
X55CrMo14	1.4110		+A		750 bis 850	Ofen, Luft	-	-	-		

(a) Für die Simulation der Wärmebehandlung anhand von Proben müssen Glüh-temperatur, Abschreckung und Anlassen festgelegt werden. **(b)** Wird die Wärmebehandlung in einem Durchlauf-Ofen vorgenommen, findet sie i.d.R. im oberen Bereich der Bandbreite statt, oft auch darüber. **(c)** U. U. ist doppeltes Glühen zu empfehlen. **(d)** Sofern der Nickelgehalt im unteren Bereich der Analysebandbreite liegt, ist eine einzige Anlassbehandlung bei 620–720 °C u.U. ausreichend. **(e)** Anlassen nach der Martensitumwandlung **(f)** Entweder 2 × 4 Std. oder 1 × 8 Std. als Maximaldauer



Stahlbezeichnung		Warmumformung		Wärmebehandlungs-Symbol	Glühen		Abschrecken		Anlassen
Werkstoffname	Werkstoffnummer	Temperatur °C	Art der Abkühlung		Temperatur (b) °C	Art der Abkühlung	Temperatur (b) °C	Art der Abkühlung	Temperatur °C
X3CrNiMo13-4	1.4313	1150 bis 900	Luft	+A (e)	600 bis 650	Ofen, Luft	-	-	-
				+QT700	-	-	950 bis 1050	Öl, Luft	650 bis 700 + 600 bis 620
				+QT780	-	-	950 bis 1050	Öl, Luft	550 bis 600
				+QT900	-	-	950 bis 1050	Öl, Luft	520 bis 580
X50CrMoV15	1.4116	1100 bis 800	langsame Abkühlung	+A	750 bis 850	Ofen, Luft	-	-	-
X4CrNiMo16-5-1	1.4418	1150 bis 900	Luft	+A (e)	600 bis 650	Ofen, Luft	-	-	-
				+QT760	-	-	950 bis 1050	Öl, Luft	590 bis 620 (f)
				+QT900	-	-	950 bis 1050	Öl, Luft	550 bis 620
X14CrMoS17	1.4104	1100 bis 800	Luft	+A	750 bis 850	-	-	-	-
				+QT650	-	-	950 bis 1070	Öl, Luft	550 bis 650
X39CrMo17-1	1.4122	1100 bis 800	langsame Abkühlung	+A	750 bis 850	Ofen, Luft	-	-	-
				+QT750	-	-	980 bis 1050	Öl	650 bis 750
Sondergüten									
X29CrS13	1.4029	1100 bis 800	langsame Abkühlung	+A	740 bis 820	Luft	-	-	-
				+QT850	-	-	950 bis 1050	Öl, Luft	625 bis 675
X46CrS13	1.4035			+A	750 bis 850	-	-	-	-
X70CrMo15	1.4109			+A	750 bis 800	Ofen, Luft	-	-	-
X2CrNiMoV13-5-2	1.4415	1150 bis 900	Luft	+QT750	-	-	950 bis 1050	Öl, Luft	600 bis 650 + 500 bis 550
				+QT850	-	-			
X53CrSiMoVN16-2	1.4150	1200 bis 1000	langsame Abkühlung	+A	800 bis 850	Ofen, Luft	-	-	-
				+QT	-		950 bis 1050	Öl + tiefgekühlt bei -80°C	180

(a) Für die Simulation der Wärmebehandlung anhand von Proben müssen Glüh-temperatur, Abschreckung und Anlassen festgelegt werden. (b) Wird die Wärmebehandlung in einem Durchlauf-Ofen vorgenommen, findet sie i.d.R. im oberen Bereich der Bandbreite statt, oft auch darüber. (c) U. U. ist doppeltes Glühen zu empfehlen. (d) Sofern der Nickelgehalt im unteren Bereich der Analysebandbreite liegt, ist eine einzige Anlassbehandlung bei 620–720 °C u.U. ausreichend. (e) Anlassen nach der Martensitumwandlung (f) Entweder 2 × 4 Std. oder 1 × 8 Std. als Maximaldauer



Stahlbezeichnung		Warmumformung		Wärmebehandlungs-Symbol	Glühen		Abschrecken		Anlassen
Werkstoffname	Werkstoffnummer	Temperatur °C	Art der Abkühlung		Temperatur (b) °C	Art der Abkühlung	Temperatur (b) °C	Art der Abkühlung	Temperatur °C
X40CrMoVN16-2	1.4123	1200 bis 1000	langsame Abkühlung	+A	800 bis 850	Ofen, Luft	-	-	-
				+QT	-		950 bis 1050	Öl + tiefgekühlt bei -80°C	180
W105CrMo17	1.4125	1100 bis 900	langsame Abkühlung	+A	780 bis 840	Ofen, Luft	-	-	-
X90CrMoV18	1.4112	1100 bis 800		+A	780 bis 840		-	-	-

(a) Für die Simulation der Wärmebehandlung anhand von Proben müssen Glüh-temperatur, Abschreckung und Anlassen festgelegt werden. **(b)** Wird die Wärmebehandlung in einem Durchlauf-Ofen vorgenommen, findet sie i.d.R. im oberen Bereich der Bandbreite statt, oft auch darüber. **(c)** U. U. ist doppeltes Glühen zu empfehlen. **(d)** Sofern der Nickelgehalt im unteren Bereich der Analysebandbreite liegt, ist eine einzige Anlassbehandlung bei 620–720 °C u.U. ausreichend. **(e)** Anlassen nach der Martensitumwandlung **(f)** Entweder 2 × 4 Std. oder 1 × 8 Std. als Maximaldauer



Anhang 10b: Empfohlene Wärmebehandlungen für ausscheidungshärtende martensitische nichtrostende Stähle gemäß DIN EN 10088-3^(a): 2014-12

Stahlbezeichnung		Warmumformung		Wärmebehandlungs-Symbol	Lösungsglühen		Ausscheidungshärten
Name	Number	Temperatur °C	Art der Abkühlung		Temperatur (b) °C	Art der Abkühlung	Temperatur °C
Standardsorten							
X5CrNiCuNb16-4	1.4542	1150 bis 900	Ofen, Luft	+AT ^(c)	1030 bis 1050	Öl, Luft	-
				+P800	1030 bis 1050		2 h 760 °C/Luft + 4 h 620 °C/Luft
				+P930	1030 bis 1050		4 h 620 °C/Luft
				+P960	1030 bis 1050		4 h 590 °C/Luft
				+P1070	1030 bis 1050		4 h 550 °C/Luft

(a) Für die Simulation der Wärmebehandlung anhand von Proben muss die Temperatur der Lösungsglühung festgelegt werden. **(b)** Wird die Wärmebehandlung in einem Durchlaufofen vorgenommen, findet sie i.d.R. im oberen Bereich der Bandbreite statt, oft auch darüber. **(c)** Nicht geeignet für die unmittelbare Anwendung; eine umgehende Ausscheidungshärtung nach dem Lösungsglühen wird empfohlen, um Rissbildung zu vermeiden.



ISER

Die Informationsstelle Edelstahl Rostfrei (ISER) ist eine Gemeinschaftsorganisation von Unternehmen und Institutionen aus den Bereichen:

- Edelstahlherstellung,
- Edelstahlhandel und Anarbeitung
- Edelstahlverarbeitung,
- Oberflächenveredelung,
- Legierungsmittelindustrie,
- Marktforschung und Verlage für nichtrostende Stähle.

Die Aufgaben der ISER umfassen die firmenneutrale Information über Eigenschaften und Anwendungen von Edelstahl Rostfrei.

Weitere Informationen:
www.edelstahl-rostfrei.de

Kontakt:
info@edelstahl-rostfrei.de

ISSF

Das International Stainless Steel Forum (ISSF) ist eine nicht-kommerzielle Forschungs- und Marktförderungsorganisation. Sie wurde 1996 gegründet und ist eine gemeinsame Initiative der Hersteller nichtrostender Stähle weltweit.

Vision:
Die Zukunft nachhaltig gestalten mit nichtrostendem Stahl

Mitglieder:
ISSF hat zwei Kategorien von Mitgliedern:
a) Unternehmen, die Hersteller von nichtrostendem Stahl sind (integrierte Werke oder Walzwerke),
b) fördernde Mitglieder, die regionale oder nationale Gemeinschaftsorganisationen dieser Industrie sind.

Das ISSF hat gegenwärtig 49 Mitglieder aus 27 Ländern, die den Großteil der Gesamtproduktion nichtrostender Stähle repräsentieren.

Weitere Informationen finden Sie auf der Website
www.worldstainless.org

Kontakt:
issf@issf.org

IMPRESSUM

Dokumentation „Martensitische nichtrostende Stähle“
1. deutschsprachige Auflage 2021

Herausgeber: Informationsstelle Edelstahl Rostfrei,
Düsseldorf (D)

Der Inhalt der vorliegenden Dokumentation leitet sich ab aus der ISSF-Publikation „Martensitic Stainless Steels“. Übersetzung und Bearbeitung der englischen Sprachfassung: Thomas Pauly, Viersen (D)

Die in dieser Broschüre enthaltenen Informationen vermitteln Orientierungshilfen. Gewährleistungsansprüche können hieraus nicht abgeleitet werden. Nachdrucke bzw. Veröffentlichungen im Internet, auch auszugsweise, sind nur mit schriftlicher Genehmigung des Herausgebers und mit deutlicher Quellenangabe gestattet.

Diese Publikation wurde durch eine Arbeitsgruppe des ISSF-Langprodukte-Ausschusses erstellt. Ihre Mitglieder sind:

- Eduardo Carregueiro (Böllinghaus Portugal Aços Especiais S. A.)
- Thiery Cremailh (Schmolz + Bickenbach Edelstahl GmbH)
- Kai Hasenclever (ISSF)
- Clara Herrera (Deutsche Edelstahlwerke GmbH)
- Bernard Héritier (ISSF)
- Stephen Jones (Outokumpu Stainless Ltd)
- Luis Peiro (Acerinox S. A.)

Die Verfasser danken Dr. Jacques Charles und Francis Chassagne für ihre kritische Durchsicht des Manuskripts. Ferner danken sie der Japan Stainless Steel Association (JSSA) und der Daido Seel Co. Ltd für ihre Unterstützung.

www.worldstainless.org
www.edelstahl-rostfrei.de