



Merkblatt 827

Magnetische Eigenschaften nichtrostender Stähle



Informationsstelle Edelstahl Rostfrei

Die Informations- stelle Edelstahl Rostfrei

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. Schwerpunkte der Aktivitäten sind

- praxisbezogene, zielgruppenorientierte Publikationen,
- Online-Informationsplattform unter www.edelstahl-rostfrei.de
- Pressearbeit für Fach- und Publikumsmedien,
- Messebeteiligungen,
- Durchführung von Schulungsveranstaltungen,
- Errichtung von Kompetenzzentren „Edelstahl-Rostfrei-Verarbeitung“,
- Informationen über Bezugsmöglichkeiten von Produkten aus Edelstahl Rostfrei,
- individuelle Bearbeitung technischer Anfragen.

Ein aktuelles Schriftenverzeichnis wird auf Anforderung gerne übersandt – oder ist einsehbar unter www.edelstahl-rostfrei.de/ Publikationen.

Inhalt

	Seite
1 Einleitung	2
1.1 Gruppeneinteilung nichtrostender Stähle	2
1.2 Magnetische Parameter und Definitionen	3
2 Magnetisches Verhalten nichtrostender Stähle	5
2.1 Ferritische korrosionsbeständige Stähle	5
2.1.1 Für magnetische Anwendungen genormte ferritische korrosionsbeständige Stähle	5
2.1.2 Für magnetische Anwendungen angebotene spezielle ferritische korrosionsbeständige Stähle	6
2.1.3 Für die allgemeine Verwendung genormte ferritische korrosionsbeständige Stähle	7
2.2 Martensitische und ausscheidungshärtende korrosionsbeständige Stähle	9
2.2.1 Kohlenstoff-Martensite	9
2.2.2 Nickel-Martensit (Weichmartensit)	11
2.2.3 Ausscheidungshärtender Stahl	11
2.3 Austenitisch-ferritische korrosionsbeständige Stähle	12
2.4 Austenitische korrosionsbeständige Stähle	14
2.4.1 Für nichtmagnetische Anwendungen genormte austenitische korrosionsbeständige Stähle	14
2.4.2 Für die allgemeine Verwendung genormte austenitische korrosionsbeständige Stähle	14
2.4.2.1 Einfluss eindispersierter Ferritanteile auf die magnetischen Eigenschaften der für die allgemeine Verwendung genormten austenitischen korrosionsbeständigen Stähle	14

	Seite
2.4.2.2 Einfluss der zu Martensit umgewandelten Gefügeanteile auf die magnetischen Eigenschaften der für die allgemeine Verwendung genormten austenitischen korrosionsbeständigen Stähle	16
3 Häufig gestellte Fragen	18
4 Literatur	19

Impressum

Merkblatt 827

Magnetische Eigenschaften nichtrostender Stähle
1. Auflage 2013

Herausgeber:

Informationsstelle Edelstahl Rostfrei
Postfach 10 22 05
40013 Düsseldorf
Telefon: 0211 / 67 07-8 35
Telefax: 0211 / 67 07-3 44
Internet: www.edelstahl-rostfrei.de
E-Mail: info@edelstahl-rostfrei.de

Autoren:

Dr.rer.nat. Denis Fofanov, Deutsche Edelstahlwerke GmbH, Witten
Dr.-Ing. Ulrich Heubner, Beratender Ingenieur für das Nickel Institute, Werdohl

Herausgeber und Autoren danken Frau Dr. Désirée Risch, Ugitech GmbH, Renningen für die kritische Durchsicht des Manuskripts und Hinweise zu seiner Ausgestaltung.

Titelfoto:

Forschungszentrum Ugitech S.A., Ugine (F)

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

1 Einleitung

Hauptmerkmal und deshalb vorherrschendes Kriterium für die Anwendung der nichtrostenden Stähle ist ihre Korrosionsbeständigkeit. Weitere Merkmale - neben anderen - sind Verarbeitbarkeit und mechanische Eigenschaften. Daneben weisen die nichtrostenden Stähle eine große Vielfalt magnetischer Eigenschaften auf. Diese sind entweder ein wichtiges Merkmal für ihre Anwendung oder müssen gelegentlich Beachtung finden. Im Einzelnen gilt:

- Die ferritischen korrosionsbeständigen Stähle haben neben ihrer verbreiteten Anwendung als Konstruktionswerkstoffe eine eigene Bedeutung als weichmagnetische Funktionswerkstoffe. Das spiegelt sich darin wider, dass es hierfür in der Elektrotechnik-Norm DIN IEC 60404-1 und nach ASTM A838-02 (2007) eigenständige genormte Sorten gibt.
- Die für die allgemeine Verwendung genormten martensitischen korrosionsbeständigen Stähle weisen nach entsprechender Wärmebehandlung hartmagnetische Eigenschaften auf, die das Potential haben, in Verbindung mit der Korrosionsbeständigkeit und den mechanischen Eigenschaften künftig zu einem Kriterium für ihre Anwendung zu werden.
- Die für die allgemeine Verwendung genormten austenitisch-ferritischen korrosionsbeständigen Stähle haben magnetische Eigenschaften, die durch die anteilig vorhandene Ferrit-Phase bestimmt werden, welche wiederum aus dem erwünschten Korrosionsverhalten und den angestrebten mechanischen Eigenschaften der Werkstoffe resultiert.
- Die für nichtmagnetische Anwendungen genormten austenitischen korrosionsbeständigen Stähle gelten als Werkstoffe mit besonderen physikalischen Eigenschaften, gehören jedoch größtenteils zugleich

zu den nichtrostenden Stählen. Die Nichtmagnetisierbarkeit ist in speziellen Fällen ein bedeutendes Kriterium für ihre Anwendung.

- Bei den für die allgemeine Verwendung genormten austenitischen korrosionsbeständigen Stählen kann das für die Herstellung (erleichterte Gießbarkeit) und Verarbeitung (verbesserte Schweißbarkeit) erwünschte Vorhandensein geringer Anteile von Deltaferrit zu einem ferromagnetischen Verhalten der Werkstoffe führen, das im Fall bestimmter Anwendungen beachtet werden muss. Auch können bei einer Kaltumformung gebildete Anteile von Martensit zu einem unerwünschten ferromagnetischen Verhalten der Werkstoffe führen. Abhilfe ist hier möglich durch eine angepasste Werkstoffwahl oder eine Wärmebehandlung. Die angepasste Werkstoffwahl wird in der Regel zu vorzugsweise im Nickelgehalt etwas höher legierten Werkstoffen führen. Die Wärmebehandlung muss in einem erneuten Lösungsglühen bestehen. Um eine solche zu vermeiden, kann zur Reduzierung der Martensitbildung und der damit einhergehenden zunehmenden elektromagnetischen Permeabilität deshalb eine Kaltbearbeitung bei erhöhten Temperaturen, beispielsweise im Bereich zwischen 50 und 100 °C oder noch darüber erprobt werden.

1.1 Gruppeneinteilung nichtrostender Stähle

Nichtrostende Stähle sind als Legierungen des Eisens mit mindestens 10,5 % Chrom (Cr) und höchstens 1,2 % Kohlenstoff (C) definiert [1] und weisen gegenüber unlegierten Stählen eine deutlich verbesserte Korrosionsbeständigkeit auf. Höhere Cr-Gehalte und weitere Legierungsbestandteile wie zum Beispiel Nickel (Ni) und Molybdän (Mo) erhöhen die Korrosionsbeständigkeit weiter [2]. Darüber hinaus kann das Zulegieren bestimmter anderer Elemente auch weitere Eigenschaften positiv beeinflussen [2], z.B. von Niob oder Titan

(Beständigkeit gegen interkristalline Korrosion), Stickstoff (Festigkeit, Korrosionsbeständigkeit) und Schwefel (Spanbarkeit).

Hauptbestandteil der nichtrostenden Stähle ist jedoch stets das Eisen. Reines Eisen ist polymorph, das heißt in unterschiedlicher Gestalt oder Modifikation vorkommend. Bei Raumtemperatur ist diese von kubisch-raumzentrierter Gitterstruktur und wird als Alpha-Phase oder Ferrit¹⁾ bezeichnet. Dieser Ferrit ist im Fall des reinen Eisens unterhalb von 910 °C thermodynamisch stabil. Oberhalb dieser Temperatur wandelt er sich in die als Gamma-Phase oder Austenit bezeichnete kubisch-flächenzentrierte Kristallstruktur um. Eine dritte Strukturänderung erfolgt bei 1390 °C, oberhalb dieser Temperatur ist dann bis zu dem bei 1538 °C liegenden Schmelzpunkt wieder die hier als Delta-Phase bezeichnete kubisch-raumzentrierte Struktur stabil. Reines Eisen ist ferromagnetisch bis herauf zu der bei 766 °C liegenden Curietemperatur, oberhalb dieser Temperatur ist es paramagnetisch [3].

Wird das Eisen mit anderen Elementen legiert, so setzt sich die vorstehend umrissene Polymorphie des Eisens in seine Legierungen hinein in unterschiedlicher Weise fort. Dabei gibt es Elemente, welche die Ferrit-Phase begünstigen, und die deshalb als Ferritbildner bezeichnet werden, und andere Elemente, welche als sogenannte Austenitbildner die Austenit-Phase begünstigen, so dass diese ihren Existenzbereich zu tieferen Temperaturen hin ausdehnt als dies beim reinen Eisen der Fall ist. Dabei bleibt im Legierungsbereich der nichtrostenden Stähle die Austenit-Phase paramagnetisch [4]. Kann bei einer weiteren Abkühlung die dann einsetzende Umwandlung in Ferrit nur noch diffusionslos erfolgen, wird das dann gebildete kubisch-raumzentrierte und ggf. tetragonal verzerrte Kristallgitter als Martensit bezeichnet. Dementsprechend kann man bei den nichtrostenden Stählen eine Einteilung in Legierungsgruppen entsprechend ihrer Kristallstruktur vornehmen [1]: die ferritischen korro-

¹⁾ Im Unterschied zum metallischen Ferrit der Eisen- und Stahltechnologie versteht man in der Elektrotechnik unter Ferriten oxidkeramische Werkstoffe aus Eisen(III)-oxid und Oxiden zweiwertiger Metalle, die als Magnetwerkstoffe von großer Bedeutung sind.

sionsbeständigen Stähle, die martensitischen und ausscheidungshärtenden korrosionsbeständigen Stähle, die austenitisch-ferritischen korrosionsbeständigen Stähle und die austenitischen korrosionsbeständigen Stähle. Nichtrostende hitzebeständige und nichtrostende warmfeste Stähle [1] werden im Rahmen dieser Ausführungen nicht behandelt.

Die Existenzbereiche der nichtrostenden ferritischen, martensitischen, austenitisch-ferritischen und austenitischen Stähle werden zweckmäßigerweise in Abhängigkeit vom so genannten Chrom- und Nickeläquivalent dargestellt [5]. Im Fall des Chromäquivalents sind dies gemäß **Bild 1** die gewichteten Summen der Ferritbildner Chrom (Cr), Molybdän (Mo), Silizium (Si) und Niob (Nb), im Fall des Nickeläquivalents die gewichteten Summen der Austenitbildner Nickel (Ni), Kohlenstoff (C) und Mangan (Mn), jeweils in Masse-%. Diese Darstellung ist kein exaktes Zustandsdiagramm, sondern beschreibt im Sinn einer Navigationshilfe näherungsweise den Gefügezustand bei Raumtemperatur nach der Abkühlung von hohen Temperaturen.

Es stammt als so genanntes Schaeffler-Diagramm ursprünglich aus der Schweißtechnik, zur Abschätzung der Gefügebestandteile von Schweißgut. In Anbetracht des näherungsweisen Charakters von **Bild 1** finden sich dafür auch Darstellungen, die davon etwas abweichen, beispielsweise in [6,7].

In **Bild 1** sind die Bereiche der hier zu betrachtenden Legierungsgruppen etwas schematisiert mit eingezeichnet [5]. Man erkennt daraus beispielsweise, dass die nichtrostenden austenitischen Werkstoffe durchaus auch Anteile an Ferrit-Phase enthalten können, und dass die nichtrostenden martensitischen Werkstoffe Anteile an ferritischer und austenitischer Phase aufweisen können. Dies bleibt nicht ohne Einfluss auf die magnetischen Eigenschaften dieser nichtrostenden Stähle.

Das Legierungselement Chrom als wichtigster Ferritbildner verändert die im ferritischen Bereich des reinen Eisens liegende Curietemperatur vergleichsweise wenig [5]. So wird das ferromagnetische Verhalten der nichtrostenden ferritischen

Stähle verständlich. Umgekehrt ist der paramagnetische Zustand nicht grundsätzlich an den austenitischen Kristallaufbau gebunden. Es gibt austenitische Legierungen, die sehr stark ferromagnetisch sind, so z.B. die Eisen-Nickellegierungen mit 36 % Nickel [8] und die weichmagnetischen Nickel-Eisenlegierungen [9].

1.2 Magnetische Parameter und Definitionen

Wegen der raschen Entwicklung und Verbreitung elektromagnetischer Systeme in der modernen Technik sind heutzutage nicht mehr lediglich das Korrosionsverhalten und die mechanischen Eigenschaften der nichtrostenden Stähle von Bedeutung, sondern ebenfalls ihre gegenseitige Wechselwirkung mit elektromagnetischen Feldern. Dabei hat für die Beurteilung des Verhaltens eines ferromagnetischen Werkstoffs die Aufnahme seiner Magnetisierungskurve dieselbe überragende Bedeutung wie die Aufnahme der Spannungs-Dehnungs-Kurve für die Beurteilung der mechanischen Eigenschaften [10]. Eine solche Magnetisierungskurve

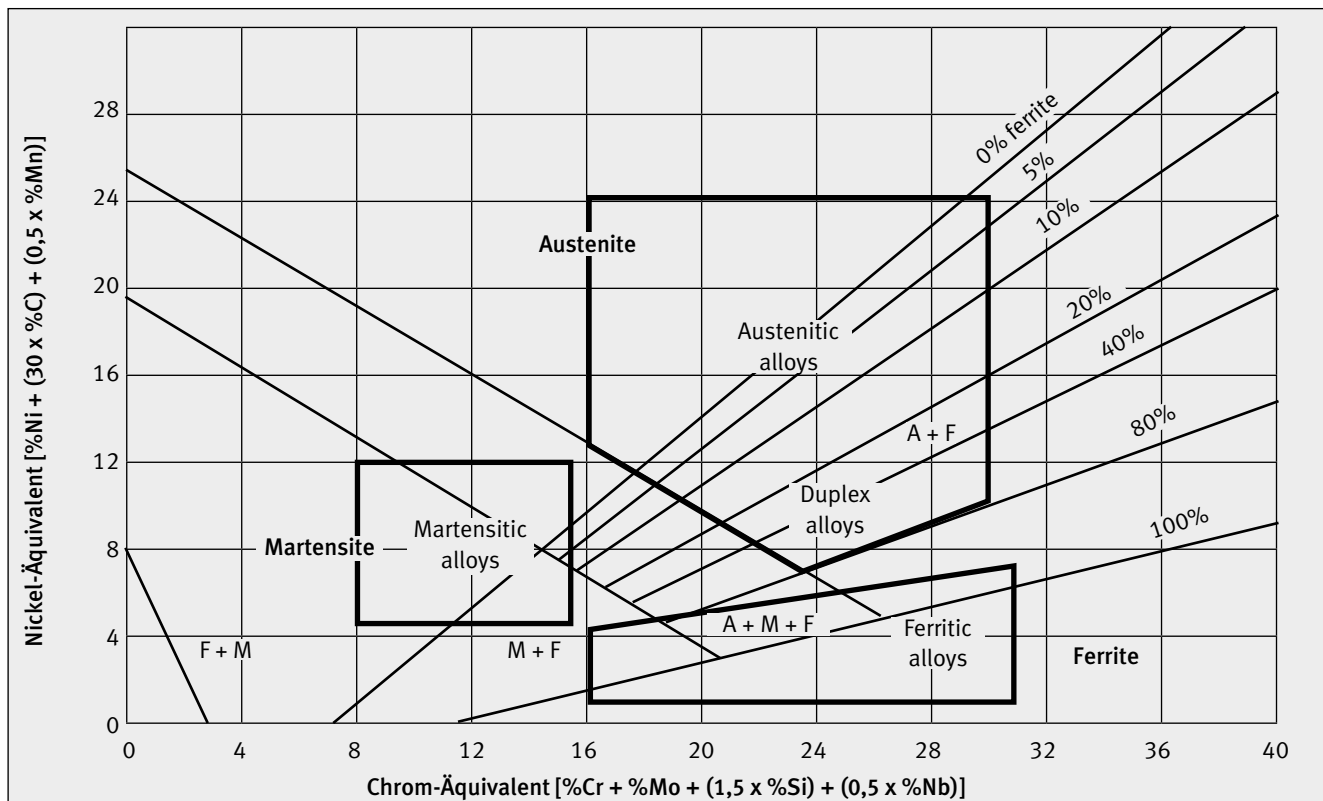


Bild 1: Gefügezustand der nichtrostenden Stähle bei Raumtemperatur nach der Abkühlung von hohen Temperaturen (Schaeffler-Diagramm), mit den etwas schematisiert eingetragenen Bereichen der üblichen nichtrostenden ferritischen, martensitischen, austenitisch-ferritischen (Duplex) und austenitischen Stähle [5]

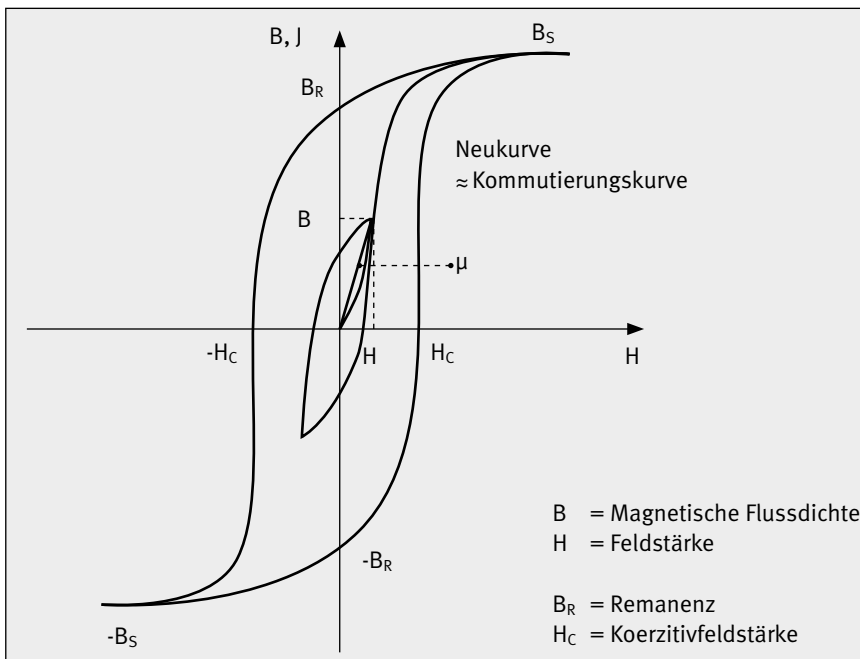


Bild 2: Schema einer Hysteresekurve eines ferromagnetischen Werkstoffes [9]

für einen ferromagnetischen Werkstoff ist als Hysteresekurve schematisch in **Bild 2** wiedergegeben. Dargestellt ist die magnetische Flussdichte B als Funktion der Feldstärke H .

Man erkennt in **Bild 2**, dass der Zusammenhang zwischen Feldstärke H und Flussdichte B nicht eindeutig ist; es bildet sich eine Hysteresekurve. Bei hohen Feldstärken H geht die Flussdichte B in die Sättigung, man erhält die Sättigungsflussdichte B_S . Die Sättigungsflussdichte B_S stellt die maximal mögliche Magnetisierung eines Materials, bzw. eine maximal mögliche Kraft dar, die in einem elektromagnetischen System erreicht werden kann.

Beim Zurückgehen auf die Feldstärke Null verbleibt im Material die Remanenz B_R . Die remanente magnetische Flussdichte B_R ist die Restmagnetisierung, die ein vorher magnetisiertes Material nach Entfernen des extern aufgetragenen magnetischen Feldes beibehält. Sie beschreibt im Grunde die verbleibende Kraft im elektromagnetischen System.

Der Nullwert der magnetischen Flussdichte wird erst durch Anlegen einer negativen Feldstärke, der Koerzitivfeldstärke $-H_C$ erreicht. Die Koerzitivfeldstärke $-H_C$ ist die magnetische Feldstärke, die notwendig ist, um ein ferromagnetisches Material vollständig zu entmagnetisieren, d.h.

je höher der H_C -Wert ist, desto mehr Energie wird gebraucht, um ein elektromagnetisches System umzuschalten bzw. auszuschalten.

Normalerweise werden die Werte von H_C und B_R angegeben, die sich bei voller Aussteuerung (bis zur Sättigung) ergeben. Bei verringerter Aussteuerung ergeben sich entsprechend kleinere Werte [10].

Die Steigung der Magnetisierungskurve wird gemäß **Bild 2** als die magnetische Permeabilität bezeichnet. Dabei gibt der Quotient B/H die absolute Permeabilität an. Häufiger benutzt wird die relative Permeabilität $\mu = B/\mu_0 H$. Dabei stellt μ_0 die magnetische Feldkonstante dar. B wird in Tesla (T), H wird in Ampere/Meter (A/m) gemessen, die magnetische Feldkonstante $\mu_0 = 1,257 \cdot 10^{-6}$ Tm/A. Die relative Permeabilität μ wird damit zu einer dimensionslosen Zahl.

Die Differenz zwischen der magnetischen Flussdichte B im ferromagnetischen Werkstoff und der magnetischen Flussdichte B_0 im Vakuum bezeichnet man als magnetische Polarisation J , gemäß der Gleichung $J = B - B_0 = \mu \mu_0 H - \mu_0 H$. Wie aus dieser Gleichung hervorgeht, kann man B_0 in dem Maß vernachlässigen, wie die relative Permeabilität μ hinreichend hoch dafür ist [9]. Damit lässt sich dann in der Technik die magnetische Polarisation der magnetischen

Flussdichte annähernd gleichsetzen, vielfach spricht man dann nur noch von Polarisation und schreibt auch für diese das Symbol B .

Im Grunde beschreibt μ , wie leicht ein Werkstoff magnetisiert werden kann. Je größer μ ist, desto schneller und mit desto weniger Energieaufwand funktioniert ein elektromagnetisches System. **In der Praxis wird unter Permeabilität stets die relative Permeabilität verstanden [10].**

Die Kurve, die bei der ersten Magnetisierung durchlaufen wird, die so genannte Neukurve, wird nicht mehr erreicht. Wenn jedoch die Ummagnetisierungen nicht bis zur Sättigung führen, gelangt man über die dann durchlaufene so genannte Kommutierungskurve wieder auf die Neukurve. In der Praxis als herausgehobene Messwerte sehr häufig benutzte Permeabilitäten sind die Anfangspermeabilität μ_i oder die aus Gründen der Praktikabilität stattdessen benutzte Permeabilität μ_4 bei $H = 4$ mA/cm und die maximale Permeabilität $\mu_{\max}$ [9].

Schließlich ist anzumerken, dass die Gestalt einer Hysteresekurve auch von der angelegten Frequenz abhängig ist. Mit zunehmender Frequenz verbreitert sich die Hystereseschleife [9]. Sofern die magnetischen Kennwerte nicht statisch oder quasistatisch (nahe „0 Hz“), sondern bei höheren Frequenzen wie beispielsweise 50 Hz gemessen worden sind, ist dies deshalb anzugeben.

Das in **Bild 2** zum Ausdruck kommende Magnetisierungsverhalten ist im Fall der nichtrostenden Stähle vor allem für die ferromagnetischen ferritischen und martensitischen korrosionsbeständigen Stähle von Bedeutung. **Ferromagnetische korrosionsbeständige Stähle** weisen eine Permeabilität $\mu \gg 1$ auf. Dabei unterscheidet man **weichmagnetische Werkstoffe**, die per Definition [11] durch eine Koerzitivfeldstärke ≤ 1000 A/m gekennzeichnet sind, und **hartmagnetische Werkstoffe**, die per Definition durch eine Koerzitivfeldstärke > 1000 A/m gekennzeichnet sind [11].

Die austenitischen korrosionsbeständigen Stähle sind hingegen

nicht in der in **Bild 2** zum Ausdruck kommenden Weise magnetisierbar, solange in ihnen keine ferritischen Phasenbestandteile und keine magnetisierbaren Ausscheidungen vorliegen, und solange keine martensitische Umwandlung auftritt. Sie sind in diesem Fall paramagnetisch, weil in diesem Zustand ihre Wechselwirkung mit einem äußeren Magnetfeld kaum merkbar ist. Sie werden deshalb häufig als nichtmagnetisch bzw. nichtmagnetisierbar oder amagnetisch bezeichnet. Tatsächlich werden jedoch auch **paramagnetische Werkstoffe** magnetisiert, das heißt, sie verstärken die von außen einwirkenden Magnetfelder. Die Kräfte, die auf sie einwirken, versuchen, sie an einen Ort höherer Feldstärke zu verschieben. Diese Kräfte sind zwar sehr klein, es gibt jedoch auch hier eine durch die relative Permeabilität μ gegebene Verknüpfung $B = \mu \cdot H$ zwischen dem äußeren magnetischen Erregerfeld H und der im Werkstoff hierdurch entstehenden Induktion B . Im Unterschied zu den ferromagnetischen Werkstoffen ist diese Permeabilität nicht wie in **Bild 2** dargestellt vom äußeren Erregerfeld H abhängig, sondern eine Werkstoffkonstante, die nur wenig größer als 1 ist, und beispielsweise bei $1 + 10^{-6}$ bis $1 + 10^{-3}$ liegt [8].

Enthält ein nichtrostender Stahl sowohl paramagnetische als auch ferromagnetische Phasen, wie im Fall der austenitisch-ferritischen korrosionsbeständigen Stähle oder Duplex-Stähle, wird sein magnetisches Verhalten von dem Anteil der ferromagnetischen Phase bestimmt.

Sorte	Bereiche der chemischen Zusammensetzung, Masse-%					
	Cr	Si	Mo	Mn	C	S*
D31-01	11 - 13	≤ 1,5	≤ 0,5	≤ 0,8	≤ 0,065	≤ 0,025
D31-02						0,25 - 0,40
D31-03	16,5 - 18,5					1,0 - 2,5
D31-04			0,25 - 0,40			
D31-05			≤ 0,03			
D31-06			0,25 - 0,40			

* Selen und Blei können anstelle von oder zusätzlich zu Schwefel beigelegt sein

Tabelle 1: Bereiche der chemischen Zusammensetzung der für magnetische Anwendungen in DIN IEC 60404-1 genormten ferritischen korrosionsbeständigen Stähle [11]

2 Magnetisches Verhalten nichtrostender Stähle

2.1 Ferritische korrosionsbeständige Stähle

2.1.1 Für magnetische Anwendungen genormte ferritische korrosionsbeständige Stähle

Die Norm DIN IEC 60404-1 [11] legt nichtrostende ferritische Stähle als eigenständige weichmagnetische Werkstoffe fest. Neben den Hauptlegierungselementen Eisen und Chrom enthalten sie Anteile der vom Herstellverfahren herrührenden Nebenelemente Silizium, Mangan und Kohlenstoff. Ferner können sie u.a. Molybdän enthalten, welches die Korrosionsbeständigkeit erhöht, und Schwefel zur Verbesserung der Spanbarkeit.

Tabelle 1 gibt die chemischen Zusammensetzungen dieser eigenständigen ferritischen korrosionsbeständigen Stähle für magnetische Anwendungen wieder. Die dort

angegebenen Bereiche der chemischen Zusammensetzung der für magnetische Anwendungen genormten ferritischen korrosionsbeständigen Stähle sollen gemäß dieser Norm ein gleichmäßiges magnetisches Verhalten ermöglichen.

Man erkennt in **Tabelle 1**, dass die Sorten D31-01 und D31-02 vom Chromgehalt her am ehesten dem für allgemeine Verwendung genormten [1] ferritischen korrosionsbeständigen Stahl EN 1.4003 nahe kommen, und dass die Sorte D31-02 eine hoch aufgeschwefelte Variante der Sorte D31-01 darstellt. In ähnlicher Weise kommen die Sorten D31-03 und D31-04 in Hinblick auf den Chromgehalt am ehesten dem für allgemeine Verwendung genormten [1] ferritischen korrosionsbeständigen Stahl EN 1.4016 nahe, mit der Sorte D31-04 als hoch aufgeschwefelte Variante der Sorte D31-03. Die Sorten D31-05 und D31-06 entsprechen vom Chrom- und Molybdängehalt her gesehen noch am ehesten dem für allgemeine Verwendung genormten [1] ferritischen korrosionsbeständigen Stahl EN 1.4521, wobei die Sorte D31-06

Sorte	Spezifischer elektrischer Widerstand [$\mu\Omega\text{m}$]	Maximale Permeabilität μ_{max}	Koerzitivfeldstärke $-H_c$ [A/m]	Magnetische Polarisierung B bei einer Feldstärke H =			
				300 A/m	500 A/m	1 kA/m	8 kA/m
				[T]			
D31-01	0,55	2000	200	1,2	1,3	1,35	1,6
D31-02				0,95	1,1	1,2	1,45
D31-03	0,75	1300	240	0,5	0,6	0,8	1,1
D31-04							
D31-05							
D31-06							

Tabelle 2: Typische magnetische Eigenschaften der für magnetische Anwendungen in DIN IEC 60404-1 genormten nichtrostenden ferritischen Stähle im schlussgeglühten Zustand [11]

Legierungstyp	Bereiche der chemischen Zusammensetzung, Masse-%								
	Cr	Si	Mo max.	Mn max.	Ni max.	C max.	S	P max.	Fe
1	17,25-18,25	0,30-0,70	0,50	0,80	0,60	0,065	0,25-0,40	0,030	Rest
2		1,00-1,50							

Tabelle 3: Bereiche der chemischen Zusammensetzungen der für magnetische Anwendungen in ASTM A838-02 (2007) genormten nichtrostenden weichmagnetischen Stähle [12]

Legierungstyp	spezifischer elektrischer Widerstand [$\mu\Omega\text{m}$]	Permeabilität μ_{max}	Koerzitivfeldstärke - H_c [A/m]	Sättigungsflussdichte B_s [T]	Curietemperatur [°C]
1	0,60	2300	143	1,53	671
2	0,76	2350	130	1,52	660

Tabelle 4: Typische physikalische und magnetische Eigenschaften der für magnetische Anwendungen in ASTM A838-02 (2007) genormten nichtrostenden weichmagnetischen Stähle [12]

eine ähnlich dem für allgemeine Verwendung genormten [1] ferritischen korrosionsbeständigen Stahl EN 1.4523 hoch aufgeschwefelte Variante der Sorte D31-05 darstellt. Wie in **Tabelle 1** angegeben sieht die Norm DIN IEC 60404-1 vor, dass Selen und Blei anstelle von oder zusätzlich zu Schwefel beigelegt sein können.

Gemäß den Aussagen von DIN IEC 60404-1 [11] sind die Sorten D31-01, D31-03 und D31-05 für Anwendungen gedacht, die gute Kaltverformungseigenschaften und Schweißbarkeit erfordern, die Sorten D31-02, D31-04 und D31-06 für Anwendungen mit erhöhten Anforderungen an die Zerspanbarkeit. Die Sorten D31-01 und D31-02 haben zur Reduzierung der Legierungskosten und zur Erhöhung der Sättigungspolarisation einen geringeren Chromgehalt. Sie sind jedoch nur für mäßig korrosive Anwendungen geeignet. Die Sorten D31-03 und D31-04 sind für den Einsatz in stärker korrosiven Umgebungen gedacht, während die Sorten D31-05 und D31-06 laut DIN IEC 60404-1 [11] für den Einsatz in den am stärksten korrosiven Umgebungen gedacht sind, allerdings unter Inkaufnahme einer gewissen Reduzierung der magnetischen Leistungsfähigkeit.

Tabelle 2 gibt typische Werte magnetischer Eigenschaften wieder, wie sie aus DIN IEC 60404-1 [11] für schlussgeglühte Werkstoffe zu entnehmen sind. Beim Vergleich mit **Tabelle 1** wird deutlich, dass der Chromgehalt die Werte der magnetischen Flussdichte oder Polarisation B und

des spezifischen elektrischen Widerstands beeinflusst, aber keinen ausgeprägten Einfluss auf die Maximalpermeabilität μ_{max} und die Koerzitivfeldstärke $-H_c$ hat.

Die Hauptanwendungsgebiete der für magnetische Anwendungen genormten nichtrostenden ferritischen Stähle liegen laut DIN IEC 60404-1 [11] in magnetischen Kernen und anderen Teilen, wo ein nichtrostender Stahl mit hoher Permeabilität erforderlich ist, der eine niedrige Koerzitivfeldstärke und einen niedrigen Restmagnetismus besitzt. Gemäß DIN IEC 60404-1 sind dies Magnetventile und elektromagnetische Geräte in Fahrzeugen, wie z.B. Einspritzpumpen und Antiblockiersysteme [11].

Neben der Norm DIN IEC 60404-1 [11] gibt es für magnetische Anwendungen der nichtrostenden ferritischen Stähle die Norm ASTM 838 - Standard Specification for Free-Machining Ferritic Stainless Soft Magnetic Alloy Bar for Relay Applications [12]. Diese beinhaltet zwei Legierungstypen mit der chemischen Zusammensetzung gemäß **Tabelle 3**.

Wie man in **Tabelle 3** erkennt, haben beide Legierungstypen einen erhöhten Schwefelgehalt zur Verbesserung der Spanbarkeit. Im Übrigen unterscheiden sich die beiden Legierungstypen im Siliziumgehalt. Zunehmende Siliziumgehalte bewirken bei den weichmagnetischen Eisenwerkstoffen einerseits eine Verminderung der Koerzitivfeldstärke und andererseits eine Erhöhung des spezifischen elektrischen Widerstands und damit

eine Reduzierung von Wirbelstromverlusten [10].

Die in ASTM A838-02 (2007) für magnetische Anwendungen genormten ferritischen korrosionsbeständigen Stähle lassen sich damit am ehesten mit der Sorte D31-04 der DIN IEC 60404-1 [11] vergleichen, oder einer hoch aufgeschwefelten Variante des für die allgemeine Verwendung genormten ferritischen korrosionsbeständigen Stahls EN 1.4016 [1].

Die Norm ASTM A838-02 (2007) sieht diese beiden Legierungstypen in der Form von Rundstangen in werkseitig geglühter oder in kalt gezogener Ausführung vor, wobei in Hinblick auf die weichmagnetischen Eigenschaften nur die Koerzitivfeldstärke Gegenstand der Spezifikation ist. Im Anhang zu dieser Norm sind typische physikalische und magnetische Eigenschaften für diese beiden Legierungstypen aufgeführt, die auszugsweise in **Tabelle 4** wiedergegeben sind.

2.1.2 Für magnetische Anwendungen angebotene spezielle ferritische korrosionsbeständige Stähle

Herstellerseitig wird eine spezifische Werkstoffauswahl ferritischer korrosionsbeständiger Stähle für magnetische Anwendungen angeboten [13], für die Sättigungsflussdichten B_s von 1,60 bis 1,70 T, Koerzitivfeldstärken H_c von 100 bis 200 A/m, Permeabilitäten μ_{max} von 1000 bis 3000 und spezifische elektrische Widerstände von 0,60 bis 0,78 $\mu\Omega\text{m}$ angegeben

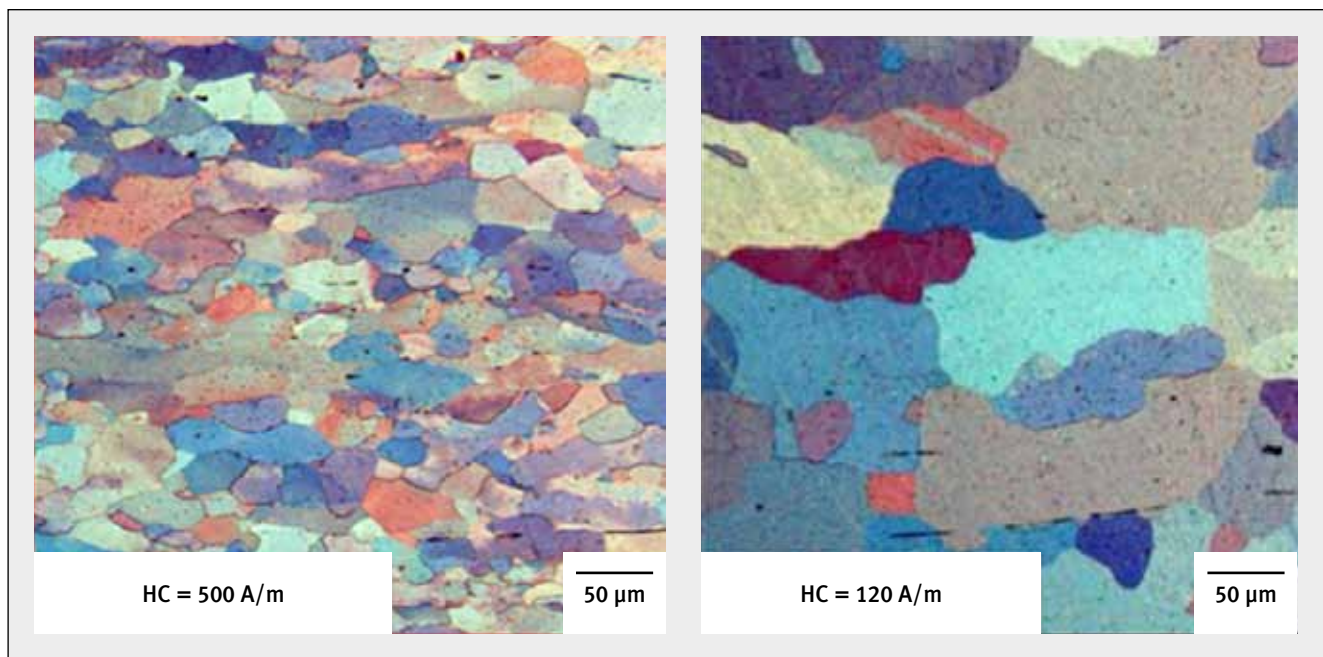


Bild 3: Gefüge eines ferritischen korrosionsbeständigen Stahls ohne (linker Bildausschnitt) und mit Schlussglühung zur Erzielung optimaler weichmagnetischer Eigenschaften (rechter Bildausschnitt), erkennbar an den in beide Bildausschnitte eingeschriebenen jeweiligen Koerzitivfeldstärken [13]

werden, mit ausreichender Korrosionsbeständigkeit gegenüber Kraftstoffen und chloridhaltigen wässrigen Medien mittlerer Aggressivität und Anwendungen unter anderem für Magnetventile in der Automobilindustrie. Dabei wird darauf hingewiesen, dass eine auf den betreffenden Werkstoff sowie die erforderlichen magnetischen Eigenschaften abgestimmte Schlussglühung unerlässlich ist, um ein optimales weiches ferromagnetisches Verhalten zu erzielen. Diese Glühung muss entweder an dem stabförmigen Vormaterial oder an den bearbeiteten Teilen vorgenommen werden.

Die Schlussglühung hat für die weichmagnetischen Eigenschaften des Endprodukts eine sehr große Bedeutung, weil hier ebenso wie bei den anderen klassischen kristallinen Materialien [9] die Beweglichkeit der

zwischen den magnetischen Elementarbereichen liegenden Blochwände [10] beeinflusst wird. Sie ist umso besser und damit die Permeabilität umso größer und die Koerzitivfeldstärke umso niedriger, je geringer nicht nur die Menge der die Bewegung der Blochwände und damit eine gleichsinnige Ausrichtung der magnetischen Elementarbereiche hindern den Verunreinigungen (nichtmetallische Einschlüsse, Schlackenteilchen, Oxide) ist, sondern auch je geringer die Zahl der für diese Beweglichkeit gleichfalls hinderlichen Korngrenzen ist, oder umgekehrt je größer die Korndurchmesser sind, wie **Bild 3** beispielhaft deutlich macht.

Ein ungünstiger Reinheitsgrad kann sich dabei doppelt negativ auf die magnetischen Eigenschaften auswirken, indem er einmal die Bewegung der Blochwände direkt behindert,

und zum anderen zusätzlich auch noch indirekt durch Behinderung des Kornwachstums bei der Schlussglühung [9].

2.1.3 Für die allgemeine Verwendung genormte ferritische korrosionsbeständige Stähle

Die ferritischen korrosionsbeständigen Stähle verfügen über ein kubisch-raumzentriertes Kristallgitter und stehen dem reinen Eisen am nächsten. So sind auch ihre magnetischen Eigenschaften denen von reinem Eisen sehr ähnlich. Deshalb sind auch die für die allgemeine Verwendung genormten ferritischen korrosionsbeständigen Stähle ebenso wie die in den Abschnitten 2.1.1 und 2.1.2 genannten für magnetische Anwendungen genormten oder angebotenen ferritischen korrosionsbeständigen Stähle weichmagnetisch.

EN Werkstoff -Nr.	EN Kurzname	Bereiche der chemischen Zusammensetzung, Masse-%					
		C max.	Si max.	Mn max.	S	Cr	Andere*
1.4003	X2CrNi12	0,030	1,00	1,50	≤ 0,015	10,5-12,5	0,30-1,00 Ni
1.4511	X3CrNb17	0,05	1,00	1,00	≤ 0,015	16,0-18,0	12xC bis 1,00 Nb
1.4105	X6CrMoS17	0,08	1,50	1,50	0,15-0,35	16,0-18,0	0,20-0,60 Mo
1.4106	X2CrMoSiS 18-2-1	0,030	2,00	1,00	0,25-0,35	17,0-19,0	1,50-2,50 Mo

* in allen Fällen ist P ≤ 0,040

Tabelle 5: Ferritische korrosionsbeständige Stähle, beispielhafte Auswahl der 3 Sorten 1.4003, 1.4511 und 1.4105 für die allgemeine Verwendung [1] zur Prüfung auf ihre magnetischen Eigenschaften [15] und der zerspanbaren weichmagnetischen Sorte 1.4106

EN Werkstoff-Nr.	Schlussglühung	Permeabilität $\mu_{\max}$	Koerzitivfeldstärke - H_c [A/m]	Sättigungsflussdichte B_s [T]
1.4003	ohne	440	800	1,80
	mit	2200	150	1,75
1.4511	ohne	600	450	1,60
1.4105	mit	1950	150	1,55

Tabelle 6: Typische magnetische Werte ferritischer korrosionsbeständiger Stähle, ohne und mit Schlussglühung für die Optimierung der weichmagnetischen Eigenschaften, ermittelt an unterschiedlichen Chargen der in Tabelle 5 angegebenen Werkstoffe [15]

Über die magnetischen Eigenschaften der ferritischen korrosionsbeständigen Stähle für allgemeine Verwendung liegen umfangreiche Untersuchungen vor [14]. Diese sind durch jüngere Messungen [15] an den drei beispielhaften ferritischen korrosionsbeständigen Stählen 1.4003, 1.4511 und 1.4105 gemäß Tabelle 5 ergänzt worden. Bei diesen handelt es sich um einen ferritischen korrosionsbeständigen Stahl mit rd.

11,5 % Cr und zwei ferritische korrosionsbeständige Stähle mit rd. 17 % Cr, einer davon mit erhöhtem Gehalt an Schwefel zur Verbesserung der Spanbarkeit. Der in Tabelle 5 an letzter Stelle genannte Werkstoff 1.4106 ist insgesamt noch etwas höher legiert als der Werkstoff 1.4105.

Man erkennt in Tabelle 6 am Beispiel des Werkstoffs 1.4003, dass im vorliegenden Fall eine den mag-

netischen Erfordernissen angepasste Schlussglühung (vgl. Abschnitt 2.1.2) die Permeabilität erheblich erhöht und die Koerzitivfeldstärke in bedeutendem Ausmaß abgesenkt hat. Eine Orientierung über die in Frage kommenden Temperaturbereiche für eine solche Schlussglühbehandlung vermittelt das Zustandsschaubild Eisen-Chrom [5], um einerseits im Fall der 16 bis 18 % Chrom enthaltenden Legierungen den Bereich der Bildung von Sigma-Phase und andererseits im Fall der 10,5 bis 12,5 % Chrom enthaltenden Legierungen den Eintritt in den Austenit-Bereich zu vermeiden. Sortenspezifische Hinweise für geeignete Glühbehandlungen ferritischer korrosionsbeständiger Stähle werden in Anlage A zu DIN EN 10088-2 [16] und DIN EN 10088-3 [17] gegeben.

Die magnetische Sättigungsflussdichte B_s hat sich durch eine Schlussglühung dagegen nur wenig verändert. Tatsächlich ist die Sättigungsflussdichte der ferritischen korrosionsbeständigen Stähle vor allem eine Funktion des Legierungsanteils, wie Bild 4 deutlich macht.

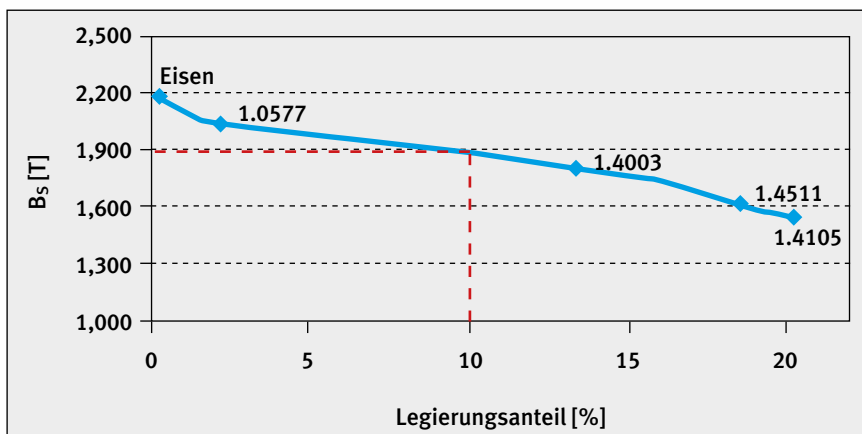


Bild 4: Einfluss des Legierungsanteils auf die Sättigungsflussdichte B_s ferritischer korrosionsbeständiger Stähle [15]. Die Legierungsanteile wurden aus den mittleren chemischen Analysen unterschiedlicher Chargen der angegebenen Werkstoffe ermittelt

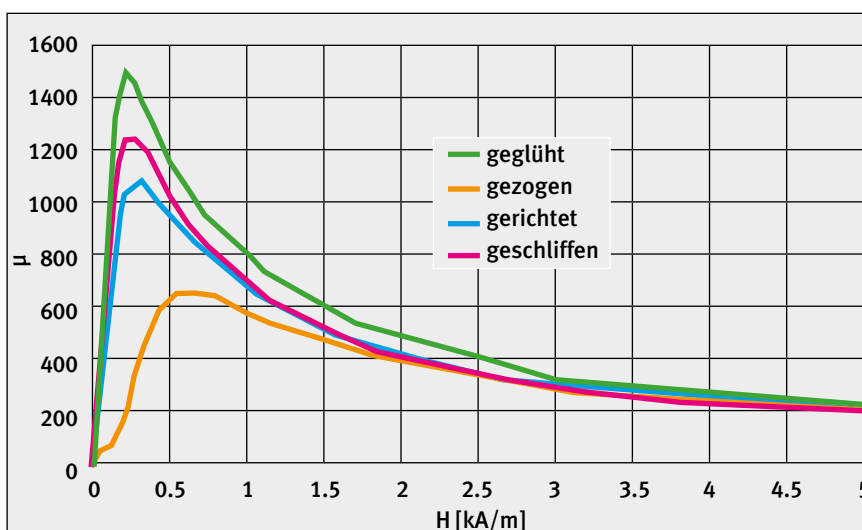


Bild 5: Beispielhafter Einfluss verschiedener Bearbeitungsschritte auf die magnetische Permeabilität des weichmagnetischen ferritischen korrosionsbeständigen Stahls 1.4106 als Funktion der Feldstärke H [19]

Technisches Eisen (99,8 Masse-% Fe) verfügt über eine magnetische Sättigung B_s von 2,15 T [18], ein niedrig legierter Edelbaustahl (Werkstoff-Nr. 1.0577) mit einem Legierungsanteil von nur 2,13 Masse-% hat demgegenüber nur 2,03 T. Je höher der Legierungsanteil eines Stahles ist, desto weniger Eisenatome können zur magnetischen Sättigung B_s beitragen und desto geringer wird dadurch der erreichbare Sättigungswert.

Weil ein nichtrostender Stahl mindestens 10,5 Masse-% Cr beinhalten muss [1], ist dessen Legierungsanteil immer größer als 10,5 Masse-%. Damit kann ein Sättigungswert von

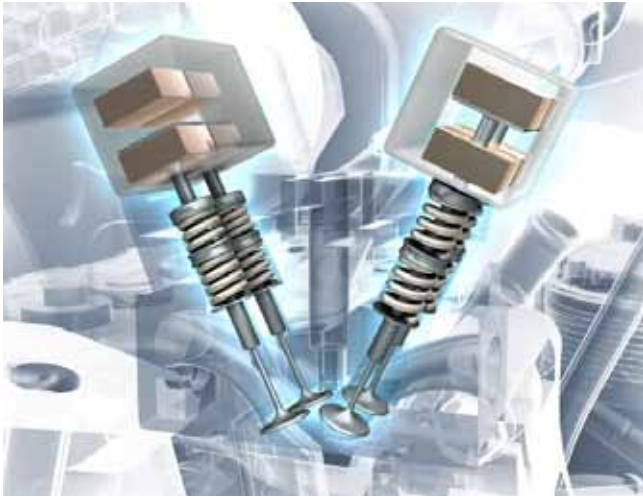


Bild 6: Elektromagnetischer Ventilantrieb „E-Valve“
(Foto: Valeo)



Bild 7: Elektromagnetische Einspritzdüse (Foto: Bosch)

1,90 T bei einem nichtrostenden Stahl gemäß **Bild 4** nicht überschritten werden.

Schließlich sei darauf hingewiesen, dass nach erfolgter Schlussglühung in den für magnetische Anwendung vorgesehenen Endprodukten im Idealfall keinerlei Kaltverfestigung vorhanden sein darf, denn schon sehr kleine Kaltverformungsgrade sind geeignet, die Koerzitivfeldstärke drastisch zu erhöhen und die Permeabilität $\mu_{\max}$ erheblich zu vermindern [14]. Auch solche Bearbeitungsschritte wie Schleifen und Richten wirken sich im Einbringen von einer Kaltverfestigung aus. In **Bild 5** wird beispielhaft gezeigt, wie sich die Bearbeitungsschritte Schleifen, Richten und Ziehen auf die magnetische Permeabilität des ferritischen korrosionsbeständigen Stahls 1.4106 auswirken können. Je nach Intensität dieser Bearbeitungsschritte kann ihr Einfluss dabei größer oder kleiner sein.

Ergänzend zu dem in Abschnitt 2.1.2 umrissenen Anwendungspotential ferritischer korrosionsbeständiger Stähle in der Magnettechnik seien noch der in **Bild 6** beispielhaft gezeigte elektromagnetische Ventilantrieb genannt, der in Zukunft die Nockenwellen ersetzen soll, und elektromagnetische Einspritzdüsen gemäß **Bild 7**.

2.2 Martensitische und ausscheidungshärtende korrosionsbeständige Stähle

2.2.1 Kohlenstoff-Martensite

Die martensitischen korrosionsbeständigen Stähle sind den ferritischen korrosionsbeständigen Stählen in ihren magnetischen Eigenschaften ähnlich. Die martensitische Struktur behindert jedoch die Magnetisierung ebenso wie die Entmagnetisierung dieser Werkstoffe. Die martensitischen korrosionsbeständigen Stähle können deshalb je nach Wärmebehandlungszustand eher in die Kategorie der hartmagnetischen Werkstoffe fallen, die nach der in [11] gegebenen Definition durch eine Koerzitivfeldstärke H_c von > 1000 A/m gekennzeichnet sind. Ihre Nutzung als korrosionsbeständige Dauerma-

gnete könnte für bestimmte Anwendungen damit sinnvoll sein [13].

Tabelle 7 zeigt eine beispielhafte Auswahl von martensitischen und ausscheidungshärtbaren korrosionsbeständigen Stählen für die allgemeine Verwendung, die für die Prüfung auf die magnetischen Eigenschaften herangezogen worden sind [15]. In der Rubrik Kohlenstoff-Martensite sind 6 martensitische korrosionsbeständige Stähle gemäß DIN EN 10088-1 [1] und am Ende ein nichtrostender Chrom-Vergütungsstahl gemäß Werkstoff-Leistungsblatt (WL) 1.4044 [20], alle mit relativ hohem Kohlenstoffgehalt, aufgeführt. Danach folgen ein Nickel- oder Weichmartensit und ein ausscheidungshärtbarer Stahl, beide gemäß DIN EN 10088-1 [1].

Ähnlich wie für die ferritischen korrosionsbeständigen Stähle ist der

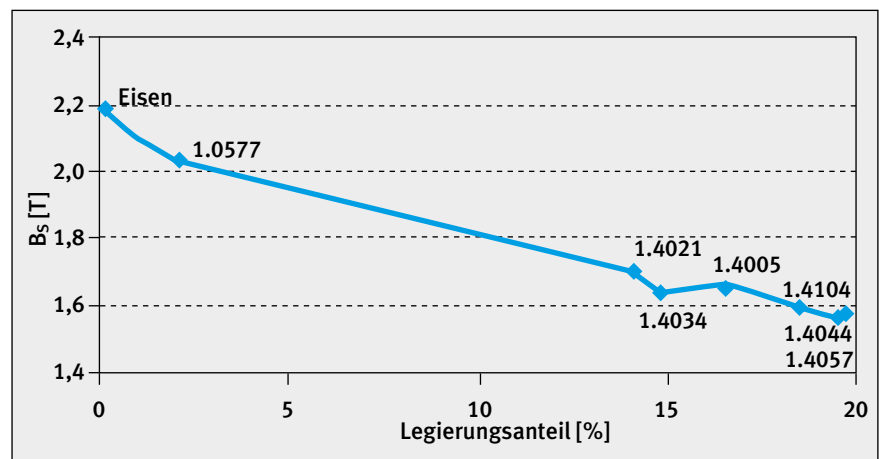


Bild 8: Einfluss des Legierungsanteils auf die Sättigungsflussdichte B_s martensitischer korrosionsbeständiger Stähle [15]. Die Legierungsanteile wurden aus den mittleren chemischen Analysen unterschiedlicher Chargen der angegebenen Werkstoffe ermittelt

EN Werkstoff-Nr.	EN Kurzname	Bereiche der chemischen Zusammensetzung, Masse-%					
		C	Si max.	Mn max.	S	Cr	Andere*
Kohlenstoff-Martensite							
1.4005	X12CrS13	0,08-0,15	1,00	1,50	0,15-0,35	12,0-14,0	≤ 0,60 Mo
1.4006	X12Cr13	0,08-0,15	1,00	1,50	≤ 0,015	11,5-13,5	≤ 0,75 Ni
1.4104	X14CrMoS17	0,10-0,17	1,00	1,50	0,15-0,35	15,5-17,7	0,20-0,60 Mo
1.4021	X20Cr13	0,16-0,25	1,00	1,50	≤ 0,015	12,0-14,0	
1.4034	X46Cr13	0,43-0,50	1,00	1,00	≤ 0,015	12,5-14,5	
1.4057	X17CrNi16-2	0,12-0,22	1,00	1,50	≤ 0,015	15,0-17,0	1,50-2,50 Ni
1.4044 (WL)	X22CrNi17-2	0,12-0,22	1,00	1,00	≤ 0,025	15,0-18,0	2,00-3,00 Ni
Nickel-Martensit (Weich-Martensit)							
1.4418	X4CrNiMo 16-5-1	≤ 0,06	0,70	1,50	≤ 0,015	15,0-17,0	4,0-6,0 Ni, 0,80-1,50 Mo, ≥ 0,020 N
Ausscheidungshärtender Stahl							
1.4542	X5CrNiCuNb 16-4	≤ 0,07	0,70	1,50	≤ 0,015	15,0-17,0	3,0-5,0 Ni, 3,0-5,0 Cu, ≤ 0,60 Mo, 5xC bis 0,45 Nb

* für 1.4044 ist P ≤ 0,035, in allen anderen Fällen ≤ 0,040

Tabelle 7: Martensitische und ausscheidungshärtende korrosionsbeständige Stähle für die allgemeine Verwendung [1] und gemäß Werkstoff-Leistungsblatt (WL) 1.4044 [20], beispielhafte Auswahl für die Prüfung auf die magnetischen Eigenschaften [15]

Wert der magnetischen Sättigung für martensitische korrosionsbeständige Stähle über die Anzahl der Eisena-tome bzw. über den Legierungsanteil bestimmt. Je höher der Legierungs-anteil ist, desto niedriger wird die magnetische Sättigung B_s , wie in **Bild 8** dargestellt. Eine magnetische Sättigung B_s von 1,9 T kann nicht überschritten werden.

Im Übrigen ist darauf hinzuweisen, dass die martensitischen korrosi-onsbeständigen Stähle nicht nur die in **Tabelle 7** angegeben chemischen Zusammensetzungen aufweisen

müssen, sondern darüber hinausge-hend auch ein ganz oder weitgehend vollständiges martensitisches Gefü-ge, ohne nennenswerte Anteile an Ferrit oder Restaustenit, welches im Bedarfsfall durch eine entsprechen-de Wärmebehandlung eingestellt werden muss. Erst damit können sie den an sie als martensitische Werk-stoffe gestellten Erwartungen sowohl hinsichtlich der mechanischen als auch hinsichtlich der magnetischen Eigenschaften gerecht werden. Eine Verwendung im weich geglühten Zu-stand ist aufgrund der dann in großer Zahl im Gefüge vorliegender Chrom-

karbide eher nachteilig [5], und zwar sowohl in Hinblick auf die magne-tischen Eigenschaften als auch auf das Korrosionsverhalten. Hinweise für geeignete Wärmebehandlungen martensitischer korrosionsbestän-diger Stähle werden jeweils im An-hang A zu DIN EN 10088-2 [16] und DIN EN 10088-3 [17] sowie im Werk-stoffleistungsblatt (WL) 1.4044 [20] für den Werkstoff 1.4044 gegeben. Eine solche Wärmebehandlung sieht ein Abschrecken aus einem jeweils im Einzelnen definierten Tempera-turbereich um 1000 °C in Öl oder an Luft und ein anschließendes An-lassen in einem der Norm zu ent-nehmenden Temperaturbereich um beispielsweise 700 °C vor. Je nach Wärmebehandlungszustand besteht das Gefüge dann aus mehr oder we-niger stark angelassenem Martensit und ausgeschiedenen Karbiden. Ein durch die höchste erzielbare Koerzi-tivfeldstärke gekennzeichnetes bes-tes hartmagnetisches Verhalten soll-te der aus dem Temperaturbereich um 1000 °C abgeschreckte Zustand erwarten lassen.

Nachfolgend wird am Beispiel des Werkstoffs 1.4021 gezeigt, wie sich das magnetische Profil eines mar-tensitischen korrosionsbeständigen

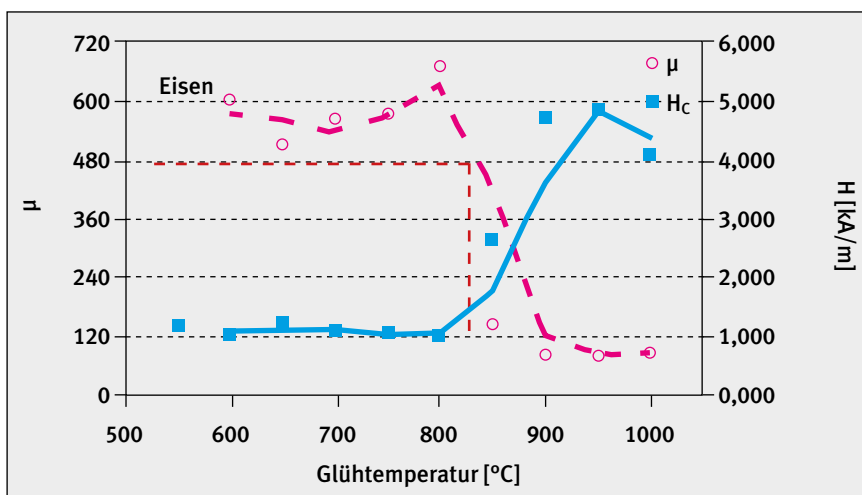


Bild 9: Einfluss der Glühtemperatur auf die magnetische Permeabilität $\mu_{\max}$ und Koerzi-tivfeldstärke H_c des martensitischen korrosionsbeständigen Stahls 1.4021 [15]

Glüh-temperatur [°C]	Koerzitivfeld- stärke - H_c [A/m]	Permeabilität $\mu_{\max}$	Remanenz B_r [T]	Sättigungs- flussdichte B_s [T]
520	2250	130	0,60	1,25
580	2280	125	0,55	1,20
600	3180	75	0,50	1,05

Tabelle 8: Typische magnetische Werte des martensitischen korrosionsbeständigen Stahls 1.4418 in Abhängigkeit von der Glüh-temperatur [15]

Glüh-temperatur [°C]	Koerzitivfeld- stärke - H_c [A/m]	Permeabilität $\mu_{\max}$	Remanenz B_r [T]	Sättigungs- flussdichte B_s [T]
560	2175	130	0,60	1,20
575	2200	150	0,65	1,30
610	2280	120	0,55	1,20

Tabelle 9: Typische magnetische Werte des ausscheidungshärtenden korrosionsbeständigen Stahls 1.4542 in Abhängigkeit von der Glüh-temperatur [15]

Stahls über eine Wärmebehandlung einstellen lässt. Die Proben wurden bei Temperaturen von 550 bis 1000 °C jeweils 1 und 2 h mit nachfolgender Abkühlung gegläht und der Einfluss der Glüh-temperatur auf die Koerzitivfeldstärke H_c und die magnetische Permeabilität $\mu_{\max}$ gemessen. Der Kurvenverlauf für 1 und 2 h Glühzeiten war praktisch identisch. Wie man in **Bild 9** erkennt, sinkt mit einer Temperaturerhöhung auf 800 °C die Koerzitivfeldstärke H_c zunächst ab und die magnetische Permeabilität μ steigt. Ab 850 °C ist eine abrupte Abnahme der magnetischen Permeabilität $\mu_{\max}$ und eine explosionsartige Zunahme der Koerzitivfeldstärke H_c zu beobachten, die über die Austenitbildung mit möglicher nachfolgender Martensitumwandlung verursacht wird. Für handelsübliche hartmagnetische Eigenschaftswerte

ausgewählter martensitischer korrosionsbeständiger Stähle sei auf [13] verwiesen.

2.2.2 Nickel-Martensit (Weichmartensit)

Der hier gemäß **Tabelle 7** betrachtete Nickel-Martensit 1.4418 zeigt ein durch eine entsprechende Wärmebehandlung einstellbares und durch die Koerzitivfeldstärke H_c von > 1000 A/m [11] definiertes hartmagnetisches Verhalten. Hinweise für geeignete Wärmebehandlungen dieses martensitischen korrosionsbeständigen Stahls werden jeweils im Anhang A zu DIN EN 10088-2 [16] und DIN EN 10088-3 [17] gegeben. Eine solche Wärmebehandlung sieht gemäß DIN EN 10088-3 [17] ein Abschrecken aus dem Temperaturbereich von 950 bis 1050 °C in Öl oder an Luft und ein anschließendes

Anlassen bei 590 bis 620 oder 550 bis 620 °C vor. Ein durch die höchste erzielbare Koerzitivfeldstärke gekennzeichnetes bestes hartmagnetisches Verhalten sollte der aus dem Temperaturbereich von 950 bis 1050 °C abgeschreckte Zustand erwarten lassen. **Tabelle 8** zeigt typische magnetische Werte für diesen Werkstoff im geglähten Zustand in Abhängigkeit von der Glüh-temperatur [15].

2.2.3 Ausscheidungshärtender Stahl

Hinweise für geeignete Wärmebehandlungen des hier gemäß **Tabelle 7** betrachteten ausscheidungshärtenden korrosionsbeständigen Stahls 1.4542 werden jeweils im Anhang A zu DIN EN 10088-2 [16] und DIN EN 10088-3 [17] gegeben. Eine solche Wärmebehandlung sieht gemäß DIN EN 10088-3 [17] ein Lösungsglühen im Temperaturbereich von 1030 bis 1050 °C mit nachfolgendem Abschrecken in Öl oder an Luft und ein anschließendes Ausscheidungshärten bei Temperaturen zwischen 550 und 760 °C vor, je nachdem, welche mechanischen Werte damit erreicht werden sollen. Der lösungsgeglühte Zustand ist nicht geeignet für eine unmittelbare Verwendung, ein unverzügliches Ausscheidungshärten wird zwecks Rissvermeidung empfohlen [17]. **Tabelle 9** zeigt typische magnetische Werte dieses ausscheidungshärtenden korrosionsbeständigen Stahls 1.4542, wie sie nach einem einfachen Glühen bei unterschiedlichen Temperaturen erhalten werden können [15]. Man erkennt ein hartmagnetisches Verhalten.

EN Werkstoff-Nr.	EN Kurzname	Bereiche der chemischen Zusammensetzung, Masse-%					
		C max.	Cr	Ni	Mo	N	Andere*
1.4362	X2CrNiN23-4	0,03	22,0-24,0	3,5-5,5	0,10-0,60	0,05-0,20	0,10-0,60 Cu
1.4462	X2CrNiMoN 22-5-3	0,03	21,0-23,0	4,5-6,5	2,50-3,5	0,10-0,22	

* Si max. 1,00; Mn max. 2,00; P max. 0,035; S max. 0,015

Tabelle 10: Austenitisch-ferritische korrosionsbeständige Stähle für die allgemeine Verwendung [1], beispielhafte Auswahl für die Prüfung auf die magnetischen Eigenschaften [15]

EN Werkstoff-Nr.	Ferritanteil [Vol.-%]	Koerzitivfeldstärke - H_c [A/m]	Permeabilität $\mu_{\max}$	Remanenz B_r [T]	Sättigungs- flussdichte B_s [T]
1.4362	51,1	600	100	0,10	0,70
1.4462	50,1	580	160	0,20	0,70
1.4462*	47,2	560	76	0,08	0,59

Tabelle 11: Typische magnetische Werte von zwei austenitisch-ferritischen korrosionsbeständigen Stählen im Lieferzustand und in einem auf geringeren Ferritgehalt geglähten Zustand* (1040 °C / 2h / H₂O) [15]

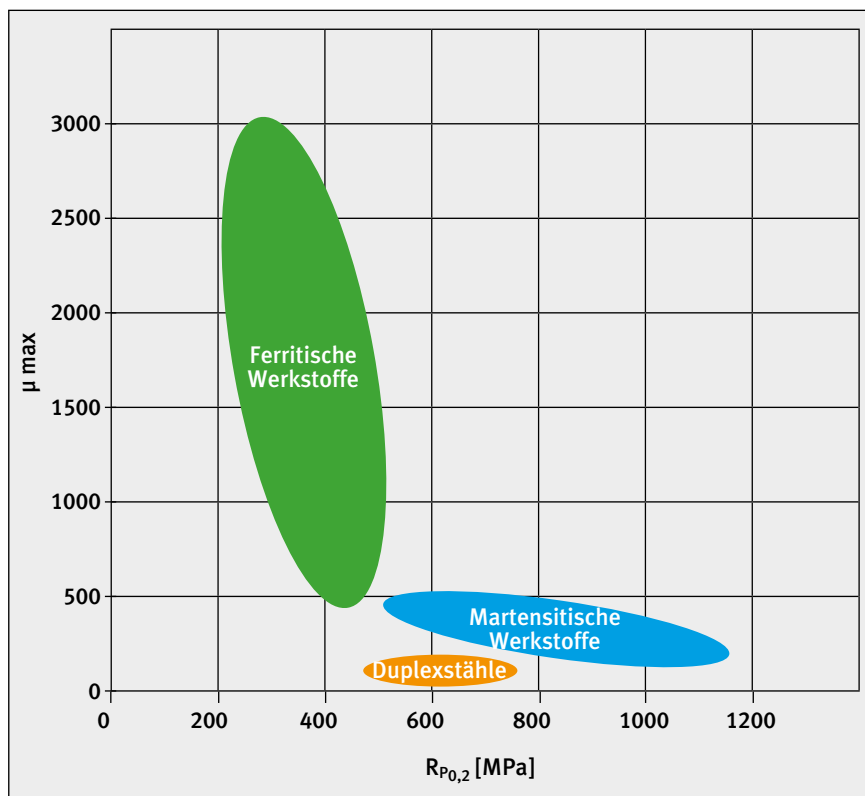


Bild 10a: Magnetische Permeabilität $\mu_{\max}$ ferritischer, martensitischer und austenitisch-ferritischer korrosionsbeständiger Stähle in Korrelation zur 0,2 %-Dehngrenze [13]

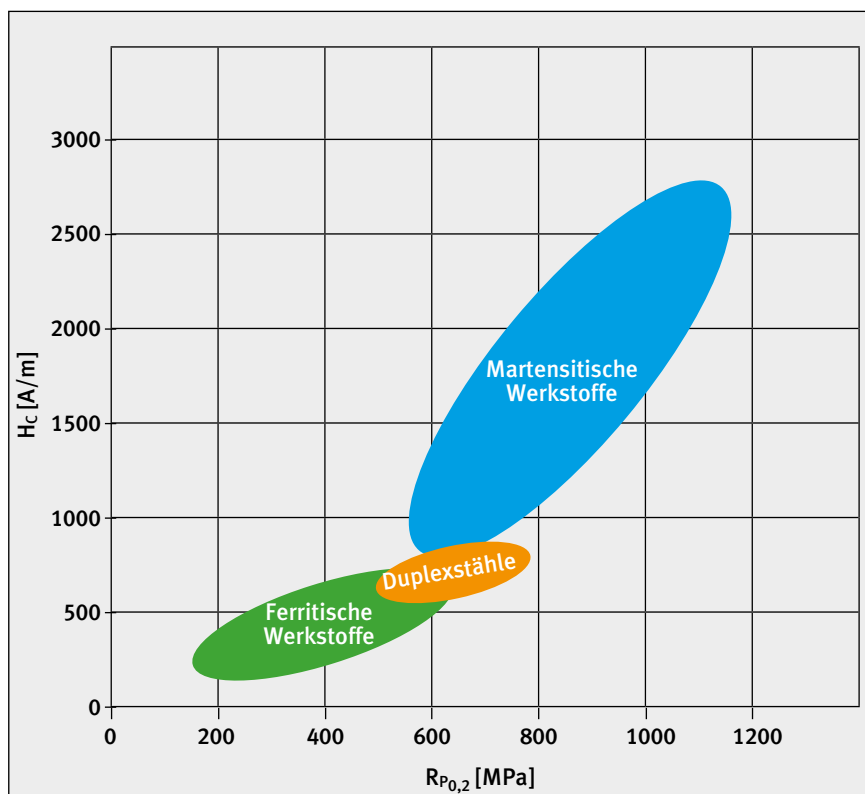


Bild 10b: Koerzitivfeldstärke H_c ferritischer, martensitischer und austenitisch-ferritischer korrosionsbeständiger Stähle in Korrelation zur 0,2 %-Dehngrenze [13]

2.3 Austenitisch-ferritische korrosionsbeständige Stähle

Tabelle 10 zeigt zwei austenitisch-ferritische korrosionsbeständige Stähle für die allgemeine Verwendung [1], die für die Prüfung der magnetischen Eigenschaften beispielhaft herangezogen worden sind [15]. Die austenitisch-ferritischen Stähle werden wegen ihres zweiphasigen austenitisch-ferritischen Gefüges im allgemeinen Sprachgebrauch auch als Duplexstähle bezeichnet. Die beiden hier ausgewählten Duplexstähle unterscheiden sich erheblich im Legierungsgehalt: der Werkstoff 1.4462 ist mit rd. 22 % Chrom, rd. 5 % Nickel und rd. 3 % Molybdän legiert, während der Werkstoff 1.4362 weniger Nickel und Molybdän enthält, dafür aber im Chromgehalt höher liegt. Der Legierungsgehalt ist bei beiden Werkstoffen aber so ausbalanciert, dass für den lösungsgeglühten Zustand (s. Anhang A in [16] und [17]) ein zu rund hälftig aus Austenit und Ferrit bestehendes Gefüge erzielt werden kann. Die beiden Phasen behindern sich gegenseitig im Kornwachstum, so dass eine Grobkornglühung wie im Fall eines ferritischen Gefüges (vgl. Bild 3) nicht wirkungsvoll ist. Durch eine geeignete Wahl der Glüh-temperatur lässt sich das Austenit/Ferrit-Verhältnis jedoch beeinflussen, wie Tabelle 11 deutlich macht.

Wie Tabelle 11 am Beispiel des Duplexstahls 1.4462 deutlich macht, werden beim gleichen Werkstoff die magnetischen Werte stark von der Höhe des Ferritanteils im Gefüge bestimmt. Ebenso wie die ferritischen Stähle sind deshalb auch die Duplexstähle weichmagnetisch.

Mit Bild 10 wird versucht, die magnetischen Werte der nichtrostenden austenitisch-ferritischen Duplexstähle gemeinsam mit denjenigen der ferritischen korrosionsbeständigen Stähle und der martensitischen korrosionsbeständigen Stähle in zwei Diagrammen darzustellen, einmal für die magnetische Permeabilität (Bild 10a) und zum anderen für die Koerzitivfeldstärke (Bild 10b). In Bild 10a ist die magnetische Permeabilität $\mu_{\max}$ über der 0,2 %-Dehngrenze aufgetra-

EN Werkstoff-Nr.	EN Kurzname	Bereiche der chemischen Zusammensetzung, Masse-%						
		C max.	Mn	N	Cr	Mo	Ni	Sonstige*
1.3816	X8CrMnN18-18	0,12	17,5-20,0	0,40-0,70	17,5-20,5	-	≤ 1,0	-
1.3964	X2CrNiMnMoNNb 21-16-5-3	0,03	4,0-6,0	0,20-0,35	20,0-21,5	3,0-3,5	15,0-17,0	Nb ≤ 0,25
1.3952	X2CrNiMoN 18-14-3	0,03	≤ 2,0	0,15-0,25	16,5-18,5	2,5-3,0	13,0-15,0	-
1.3980	X5NiCrTiMoV26-5	0,08	≤ 2,0	-	13,5-16,0	1,0-1,5	24,0-27,0	Ti 1,9-2,3; V 0,10- 0,50; Al ≤ 0,35; B 0,003- 0,010

* Si ≤ 1,0, für P und S siehe [21]

Tabelle 12: Nichtmagnetisierbare Stähle gemäß [21] in beispielhafter Auswahl

gen. Wie man in diesem Diagramm erkennt, gibt es hier offensichtlich eine Korrelation dahingehend, dass die Permeabilität mit zunehmender 0,2 %-Dehngrenze im Bereich der ferritischen korrosionsbeständigen Stähle sehr stark und sodann im Bereich der martensitischen korrosionsbeständigen Stähle in geringerem Umfang weiter abnimmt. Die Permeabilität der nichtrostenden Duplexstähle liegt unter derjenigen der martensitischen korrosionsbeständigen Stähle, ohne dass hier eine Korrelation zur 0,2 %-Dehngrenze deutlich wird.

Einheitlicher korreliert die Koerzitivfeldstärke H_c mit der 0,2 %-Dehngrenze, wie **Bild 10b** deutlich macht: sowohl im Bereich der ferritischen korrosionsbeständigen Stähle als auch im Bereich der martensitischen korrosionsbeständigen Stähle nimmt die Koerzitivfeldstärke mit der 0,2 %-Dehngrenze im Rahmen einer gewissen Streubreite zu. Die Duplexstähle fügen sich mit ihrer Koerzitivfeldstärke dazwischen. Eine solche Korrelation der Koerzitivfeldstärke, die man als magnetische Härte auffassen kann, mit mechanischen Härte- oder Festigkeitswerten wie der

0,2%-Dehngrenze ist für kristalline metallische Werkstoffe zu erwarten, weil die Beweglichkeit der Blochwände einerseits und der Versetzungen andererseits durch vergleichbare Hindernisse eingeschränkt wird.



Bild 11: Anwendung des nichtmagnetisierbaren austenitischen korrosionsbeständigen Stahls 1.3964 beim Bau des Minensuchers „Herten“ (Foto: Deutsche Marine)

EN Werkstoff-Nr.	EN Kurzname	Bereiche der chemischen Zusammensetzung, Masse-%					
		C max.	Cr	Ni	Mo	Cu	Sonstige*
1.4307	X2CrNi18-9	0,030	17,5-19,5	8,0-10,5	-	-	
1.4301	X5CrNi18-10	0,07	17,5-19,5	8,0-10,5	-	-	
1.4305	X8CrNiS18-9	0,10	17,0-19,0	8,0-10,0	-	≤ 1,00	S 0,15-0,35
1.4404	X2CrNiMo17-12-2	0,030	16,5-18,5	10,0-13,0	2,00-2,50	-	
1.4435	X2CrNiMo18-14-3	0,030	17,0-19,0	12,5-15,0	2,50-3,00	-	
1.4567	X3CrNiCu18-9-4	0,04	17,0-19,0	8,5-10,5	-	3,0-4,0	

* Si ≤ 1,0; Mn ≤ 2,0; P ≤ 0,045; S ≤ 0,015 (sofern nicht anders angegeben); N ≤ 0,11

Tabelle 13: Austenitische korrosionsbeständige Stähle für die allgemeine Verwendung [1] in beispielhafter Auswahl

2.4 Austenitische korrosionsbeständige Stähle

2.4.1 Für nichtmagnetische Anwendungen genormte austenitische korrosionsbeständige Stähle

Nach weit verbreitetem Verständnis unterscheiden sich austenitische nichtrostende Stähle von ferritischen nichtrostenden Stählen dadurch, dass sie nicht magnetisierbar sind. Das gilt jedoch nur unter der Voraussetzung, dass das Gefüge der zur austenitischen Kategorie zählenden korrosionsbeständigen Stähle wirklich vollständig austenitisch ist, und keine Anteile von Ferrit, Martensit oder anderweitigen magnetisierbaren Ausscheidungen oder Einschlüssen enthält.

Aus der Notwendigkeit, auch besonders anspruchsvolle Forderungen an die Nichtmagnetisierbarkeit erfüllen zu müssen, ist die gesonderte Kategorie der nichtmagnetisierbaren Stähle (amagnetischen Stähle) entstanden [21]. Diese gelten auf Grund ihrer Nichtmagnetisierbarkeit als Werkstoffe mit besonderen physikalischen Eigenschaften, die in Hinblick auf ihre Werkstoffnummern den Klassen 38 und 39 zugeordnet sind. Der größte Teil dieser Werkstoff-

fe gehört infolge seines Chrom- und Kohlenstoffgehalts definitionsgemäß [1] jedoch zugleich zu den nichtrostenden Stählen und ist damit Teil der Edelstahl-Rostfrei-Familie. **Tabelle 12** gibt einige dieser Werkstoffe in beispielhafter Auswahl wieder.

Man erkennt in **Tabelle 12**, dass zur Stabilisierung des Austenits bei den nichtmagnetisierbaren Stählen zum Teil sehr hohe Mangangehalte vorgesehen sind. Für diese nichtmagnetisierbaren Werkstoffe ist in SEW 390 [21] eine relative magnetische Permeabilität von höchstens 1,01 definiert, die in der Regel bei einer Feldstärke von 8000 A/m ermittelt wird. Die nichtmagnetisierbaren Werkstoffe finden Anwendung u.a. in der Elektrotechnik für Induktorkappen und Kappenringe (1.3816), im Schiffbau und in der chemischen Industrie (1.3964), im Maschinen- und Apparatebau (1.3952 und 1.3980) und als Schwerstangen für Bohrstranganwendungen in der Erdöl- und Erdgasbohrtechnik (1.3949 und ähnliche herstellerspezifische Werkstoffe [22]). Angaben darüber, in welchem Umfang eine Kaltformgebung möglich ist, ohne dass die Nichtmagnetisierbarkeit infolge einer Martensitbildung verloren geht, finden sich in [8] und in [21] oder sind beim Hersteller zu erfragen.

Beispielsweise bildet sich in dem austenitischen korrosionsbeständigen Stahl 1.3964 auch nach hohen Kaltverformungen (bis ca. 80 %) kein Martensit [8]. Der Stahl bleibt nicht-magnetisierbar. **Bild 11** zeigt eine typische Anwendung dieses Stahls als Konstruktionswerkstoff im Sonderschiffbau. Er findet sowohl für den Bau von Minenabwehrfahrzeugen als auch für den Bau von Unterseebooten (beispielsweise Klasse 205 und Klasse 206 der Bundesmarine) Verwendung.

2.4.2 Für die allgemeine Verwendung genormte austenitische korrosionsbeständige Stähle

2.4.2.1 Einfluss eindispersierter Ferritanteile auf die magnetischen Eigenschaften der für die allgemeine Verwendung genormten austenitischen korrosionsbeständigen Stähle

Die in diesem und in dem nachfolgenden Unterkapitel in Auswahl betrachteten austenitischen korrosionsbeständigen Stähle sind in **Tabelle 13** aufgeführt. Vergleicht man die in dieser Tabelle angegebenen chemischen Zusammensetzungen mit dem Diagramm in **Bild 1**, muss man beispielsweise für den austeni-

EN Werkstoff-Nr.	Kurzname	Magnetische Permeabilität μ	
		Lieferzustand	Lösungsgeglüht
1.4307	X2CrNi18-9	1,630	1,056
1.4301	X5CrNi18-10	1,075	1,011
1.4305	X8CrNiS18-9	1,260	1,017
1.4404	X2CrNiMo17-12-2	1,250	1,100
1.4435	X2CrNiMo18-14-3	1,070	-

Tabelle 14: Magnetische Permeabilität austenitischer korrosionsbeständiger Stähle im Lieferzustand und nach einem Lösungsgeglühen von 2h bei 1050 °C [15]

tischen korrosionsbeständigen Stahl 1.4301 in der Regel einen Ferritgehalt von einigen Vol.-% erwarten, und nur in einem hierfür günstigsten Ausnahmefall eine vollständige Freiheit von Ferrit. Ein solcher Ferritanteil muss dem austenitischen korrosionsbeständigen Stahl einen schwachen Ferromagnetismus verleihen. Gleiches gilt für den austenitischen korrosionsbeständigen Stahl 1.4404, wobei die Norm DIN EN 10088-1 [1] allerdings vorsieht, dass u.a. zur Erzielung einer geringeren magnetischen Permeabilität der Nickelgehalt innerhalb hierfür angegebener Grenzen erhöht werden darf. Die Basler Norm BN 2 [23,24] schreibt für Erzeugnisse aus dem austenitischen korrosionsbeständigen Stahl 1.4435 (vgl. **Tabelle 13**) einen Ferritanteil von max. 0,2 % (für Blech und nahtlose Rohre) und max. 0,5 % (für geschweißte Rohre) vor.

Tatsächlich ist die chemische Zusammensetzung zahlreicher austenitischer korrosionsbeständiger Stähle mit Ausnahme der sehr viel höher legierten und damit stabil austenitischen Stähle [24] wie beispielsweise 1.4539 so angelegt, dass sie bei hohen Temperaturen die dort Delta(δ)-Ferrit genannten Ferritanteile aufweisen, welche sich beim Abkühlen auf Raumtemperatur nicht vollständig in Austenit umwandeln. Sowohl die Gießbarkeit als auch die Schweißbarkeit werden durch derartige Ferritanteile verbessert, weil die Neigung zur Heißrissigkeit damit geringer wird [25]. Für die Schweißbarkeit spielt dieser Sachverhalt eine hervorragende Rolle und wird in der einschlägigen Literatur [5,7] deshalb in der Regel in diesem Zusammenhang und hier vor allem in Hinblick auf das Schweißgut behandelt. Wie man dem in **Bild 1** gezeigten Diagramm entnimmt, sind die hier eine Rolle spielenden Elemente haupt-

sächlich Chrom, Molybdän und Silizium als so genannte Ferritbildner und Nickel, Kohlenstoff und Mangan als so genannte Austenitbildner. Für eine verfeinerte Betrachtung lassen sich diesen Elementen noch andere im Stahl enthaltene Legierungs- und Begleitelemente hinzufügen [5,25]. Die für einen austenitischen korrosionsbeständigen Stahl bei Raumtemperatur zu erwartenden Ferritanteile in Vol.-% und damit die von dorthier rührenden magnetischen Eigenschaften hängen in der in **Bild 1** angedeuteten Weise von der chemischen Zusammensetzung ab. Daneben spielen der Herstellweg und die thermomechanische Vorgeschichte eine Rolle. Letzteres wird mit dem in **Tabelle 14** gezeigten Einfluss einer Lösungsglühbehandlung auf die zu messenden magnetischen Permeabilitätswerte beispielhaft deutlich gemacht.

Tabelle 14 zeigt die magnetische Permeabilität einiger austenitischer korrosionsbeständiger Stähle für die allgemeine Verwendung im Lieferzustand und nach einem Lösungsglügen. Nimmt man den in SEW 390 [21] per Definition festgesetzten Wert von höchstens 1,01 für die nichtmagnetisierbaren nichtrostenden Stähle als Maßstab (vgl. Abschnitt 2.4.1), sind für den Lieferzustand erhöhte Permeabilitätswerte infolge eindispersierten Ferrits oder/und der Bildung von Verformungsmartensit beim abschließenden Richt- bzw. Zerspanvorgang anzunehmen. Das nachfolgende Lösungsglügen vermindert die Permeabilitätswerte beträchtlich, jedoch nicht auf Werte von weniger als 1,01, so dass das Lösungsglügen zwar eventuell vorhanden gewesen Verformungsmartensit beseitigt haben sollte, aber dass Anteile von Deltaferrit offensichtlich verblieben sind.

Ein anderer Weg als das Lösungsglügen, vorhandenen Deltaferrit und damit die restliche Magnetisierbarkeit zu eliminieren, wäre ein Glühen bei Temperaturen zwischen 700 und 800 °C. Bei diesen Temperaturen wandelt sich Deltaferrit in die nicht magnetische Sigma-Phase um. Allerdings leiden durch die Anwesenheit der spröden Sigma-Phase die mechanischen Eigenschaften. Infolgedessen sollte dieser Weg vermieden werden [15].

Ein weiterer Grund für eine vorhandene Magnetisierbarkeit der austenitischen korrosionsbeständigen Stähle kann eine falsch durchgeführte Wärmebehandlung sein. Bei vielen austenitischen korrosionsbeständigen Stählen kann sich Ferrit bei 500-600 °C ausscheiden. Der Prozess ist relativ langsam und macht sich erst bemerkbar, wenn das Material ca. 30-60 Minuten in diesem Temperaturbereich gehalten wird [15].

Speziell für das Schweißgut gilt, dass es zurzeit keine Messverfahren gibt, die es erlauben, den absoluten Deltaferrit-Gehalt entweder zerstörend oder zerstörungsfrei zu bestimmen. Dieser Umstand führte international zur Entwicklung und Anwendung des Konzepts der **Ferrit-Nummer (FN)** [26]. Unter der Ferrit-Nummer ist die Beschreibung des Deltaferrit-Gehalts im Schweißgut nach einem genormten Verfahren zu verstehen. Solche genormten Verfahren sind in [26] und [27] angegeben. Die Ferrit-Nummer entspricht bis herauf zu einem Wert von 8 näherungsweise dem Ferritgehalt in Vol.-%, darüber ist sie etwas größer [5]. In der internationalen Norm EN ISO 8249 [26,27] wird zur Bestimmung der Ferrit-Nummer als genormtes Messverfahren die Bestimmung der Abreißkraft festgelegt, die nötig ist, um einen Magneten definierter Stärke und Größe von einer

EN Werkstoff-Nr.	EN Kurzname	M_{d30} (°C)	Magnetische Permeabilität μ nach einer Kaltverformung (%)			
			0	10	20	30
1.4305	X8CrNiS18-9	-19	1,003	1,050	1,620	3,420
1.4301	X5CrNi18-10	-41	1,012	1,046	1,626	3,090
1.4435	X2CrNiMo18-14-3	-153	1,007	1,008	1,024	1,130
1.4567	X3CrNiCu18-9-4	-185	1,005	1,005	1,012	1,082

Tabelle 15: Magnetische Permeabilität austenitischer korrosionsbeständiger Stähle unterschiedlicher gemäß (Gl.1) errechneter Martensittemperatur M_{d30} in Abhängigkeit vom Kaltverformungsgrad [15]

Schweißgutprobe zu trennen. Den Zusammenhang zwischen Abreißkraft und FN erhält man durch Kalibrierung mit Primär-Normalen, die aus einem magnetischen Stahl und einem nichtmagnetischen Überzug bestimmter Dicke bestehen, wobei jeder Dicke ein FN -Wert zugeordnet ist. Als Standard-Magnet ist ein zylindrischer Dauermagnet mit 2 mm Durchmesser und etwa 50 mm Länge festgelegt, von dem ein Ende halbkugelig mit 1 mm Radius und poliert ist. Das verwendete Messgerät muss es erlauben, eine zunehmende Abreißkraft auf den Magnet senkrecht zur Prüfoberfläche aufzubringen. Das Messgerät soll eine genaue Messung der Abreißkraft ermöglichen. Die Oberfläche des zu prüfenden Schweißguts muss blank und eben bearbeitet sein.

Gemäß Basler Norm [23] werden unter Ferrit alle mit einem magnetinduktiven Ferrit-Messgerät (z.B. Fischer-Ferritscope) erfassbaren Phasen im austenitischen Grundgefüge verstanden, wobei eine Messtiefe von 3 mm erfasst sein muss. Die Kalibriernormale derartiger Messgeräte müssen rückführbar sein auf Sekundärstandards, welche die genannte internationale Norm ISO 8249 [26] und die AWS A4.2M [27] erfüllen.

2.4.2.2 Einfluss der zu Martensit umgewandelten Gefügeanteile auf die magnetischen Eigenschaften der für die allgemeine Verwendung genormten austenitischen korrosionsbeständigen Stähle

Wie man dem in Bild 1 gezeigten Diagramm entnehmen kann, befinden sich austenitische korrosionsbeständige Stähle mit verhältnismäßig niedrigen Chrom- und Nickelgehalten nahe der Grenze zum Zustandsbereich der Martensit enthaltenden Mischgefüge. In diesem Grenzbereich ist der Austenit bei Raumtemperatur bereits instabil und kann sich durch Abkühlung auf tiefe Temperaturen oder durch Kaltverformung bei Raumtemperatur zumindest teilweise in Martensit umwandeln. Da Martensit ebenso wie Ferrit magnetisierbar ist, hat diese Umwandlung entsprechende magnetische Eigenschaften des austenitischen korrosionsbeständigen Stahls zur Folge. Es gilt aber, dass mit steigenden Gehalten sowohl von Austenitbildnern als auch von Ferritbildnern die Stabilität des austenitischen Gefüges gegenüber einer Umwandlung in Martensit durch Tiefkühlung und/oder Kaltverformung zunimmt.

Um die Neigung zur Martensitumwandlung einschätzen zu können, ist die folgende Formel zur Berechnung der **Martensittemperatur** M_{d30} vorgeschlagen worden [28]:

$$M_{d30} (^{\circ}\text{C}) = 551 - 462(\text{C} + \text{N}) - 9,2\text{Si} - 8,1\text{Mn} - 13,7\text{Cr} - 29(\text{Ni} + \text{Cu}) - 18,5\text{Mo} - 68\text{Nb} \quad (\text{Gl. 1})$$

Mit dieser Gleichung wird aus dem Gehalt an Legierungselementen (in Masse-%) die Temperatur berechnet, bei der nach einer Verformung von 30 % insgesamt 50 % des Werkstoffvolumens in Martensit umgewandelt worden sind. Je niedriger diese Martensittemperatur M_{d30} liegt, desto stabiler ist der Austenit, und zwar auch gegenüber einer Kaltverformung. Dieses wird mit Tabelle 15 verdeutlicht.

Gemäß der in der 3. Spalte von Tabelle 15 für die 4 nichtrostenden Stähle jeweils angegebenen Martensittemperatur sollte der dort erstgenannte austenitische korrosionsbeständige Stahl bei einer Kaltverformung sehr stark zur Bildung von Verformungsmartensit neigen, die darunter stehenden austenitischen korrosionsbeständigen Stähle jedoch in zunehmend schwächerem Umfang. Alle 4 Werkstoffe und darunter besonders

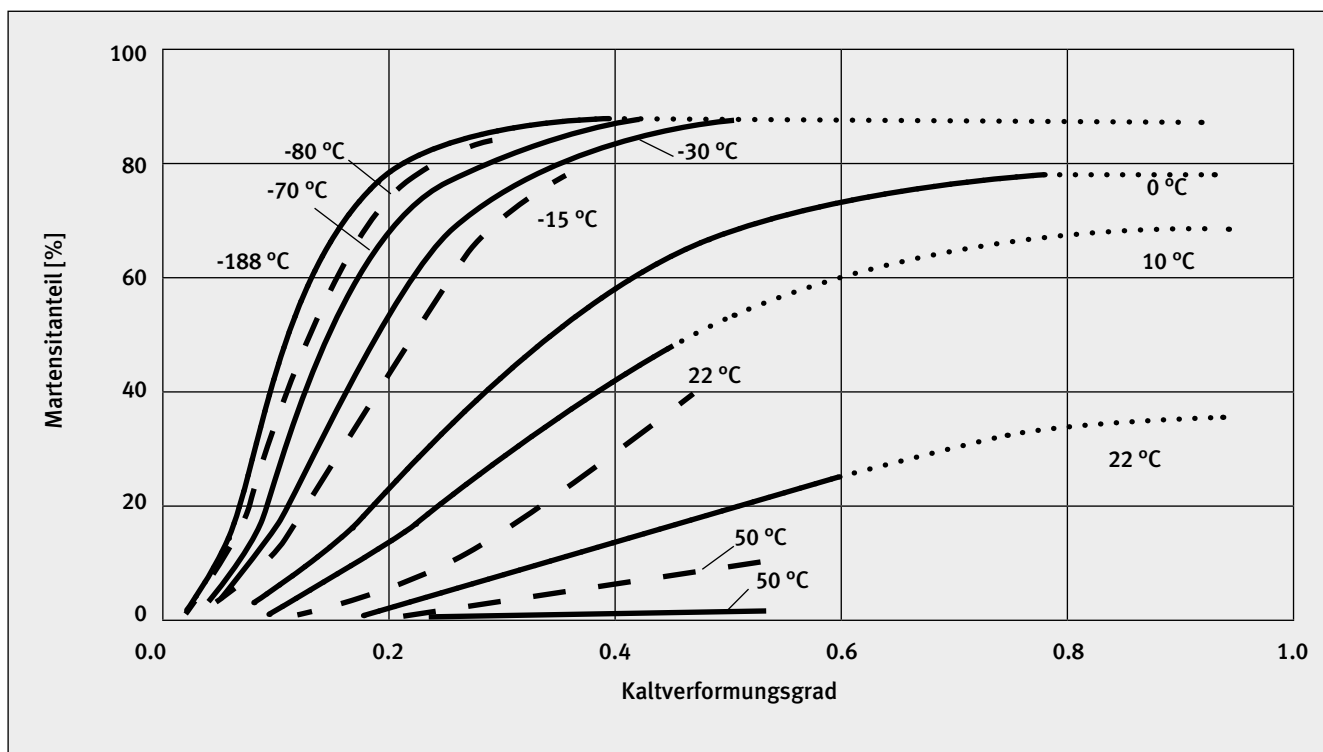


Bild 12: Ausmaß der Bildung von Verformungsmartensit bei einem austenitischen korrosionsbeständigen Stahl vom Typ 304 als Funktion des Kaltverformungsgrads bei unterschiedlichen Kaltverformungstemperaturen, aus [5], nach [29], durchgezogene Linien nach [30], unterbrochene Linien nach [31], gepunktete Extrapolationen nach [32]

ausgeprägt der Werkstoff 1.4301 weisen auch schon im nicht kaltverformten Zustand eine Permeabilität größer als $1 + 10^{-6}$ bis $1 + 10^{-3}$ auf (vgl. Abschnitt 1.2), was das Vorhandensein von etwas Deltaferrit möglich erscheinen lässt. Nimmt man bei zunehmenden Kaltverformungsgraden die magnetische Permeabilität als Indikator für die zunehmende Bildung von Verformungsmartensit, so ist diese Zunahme bei dem austenitischen korrosionsbeständigen Stahl 1.4305 insofern am stärksten, als er nach 30 % Kaltverformung die höchste magnetische Permeabilität aufweist. Der Stahl 1.4301 liegt insgesamt gesehen etwas darunter, noch mehr der Stahl 1.4435. Die geringe Kaltverfestigung der Kaltstauchgüte 1.4567 spiegelt sich in der vergleichsweise niedrigen magnetischen Permeabilität nach 30 % Kaltverformung wider.

Wie man **Bild 1** und der zugehörigen Beschreibung entnimmt, gehört Kohlenstoff als Legierungselement zu den so genannten Austenitbildnern. Diese Austenitbildner begünstigen nicht nur die Bildung von Austenit sondern in der Folge mit der beispielsweise aus **(Gl. 1)** hervorgehenden Gewichtung auch die Stabilität des Austenits. Entsprechend **(Gl. 1)** verschiebt der Kohlenstoffgehalt mit einem Faktor von 462 deshalb die Martensittemperatur M_{d30} zu tieferen Temperaturen und damit zugleich die Bildung von Verformungsmartensit zu höheren Kaltverformungsgraden. Von dort her gesehen, sollte eine LC-Güte wie 1.4307 bei einer Kaltumformung verstärkt zur Bildung von Verformungsmartensit und damit zu erhöhten magnetischen Permeabilitätswerten neigen. Bei näherem Betrachten ist dieser Effekt aber eher gering. Geht man für die Sorte 1.4301 gemäß ihrem Kurznamen [1] von einem mittleren Kohlenstoffgehalt von 0,05 % aus, und für die Sorte 1.4307 von 0,02 %, so geht die Differenz von 0,03 % in **(Gl. 1)** gemäß dem dort angegebenen Faktor von 462 nur mit einem Wert von rd. 14 ein. Der Einfluss unterschiedlicher Gehalte an Nickel kann bei einem Vergleich der 3 Sorten 1.4301, 1.4306 und 1.4307 deutlich größer sein, denn ein Unterschied im Nickelgehalt von 1 oder 2 %, wie ihn die Kurznamen der 3 Sorten zum Ausdruck bringen, bedeutet in **(Gl. 1)**

bei dem dort angegeben Faktor einen Wert von 29 bzw. 59, also einen zwei- bis viermal größeren Einfluss als derjenige des Kohlenstoffgehalts. Genauso wie der Einfluss des Nickels wird mit **(Gl. 1)** der Einfluss des Kupfers als Legierungselement bewertet. Von dorthier gesehen werden die in **Tabelle 15** angegebenen sehr niedrigen M_{d30} -Werte und der entsprechend langsame Anstieg der magnetischen Permeabilität bei zunehmender Kaltverformung für die austenitischen korrosionsbeständigen Stähle 1.4435 und 1.4567 trotz des niedrigen Kohlenstoffgehalts beider Sorten verständlich.

Es versteht sich, dass bei den mit Titan stabilisierten Sorten 1.4541 und 1.4571 hier nicht der gesamte Kohlenstoffgehalt in Ansatz gebracht werden darf, sondern im Fall ordnungsgemäß erfolgter Stabilisierungsglühlung nur der nicht an das Titan gebundene Rest-Kohlenstoffgehalt, das heißt derjenige einer LC-Güte.

Neben dem Ausmaß der Kaltverformung ist darüber hinaus auch die Temperatur, bei der die Kaltverformung durchgeführt wird, von erheblichem Einfluss auf das Ausmaß der Martensitumwandlung und damit auf die magnetische Permeabilität der umgeformten Erzeugnisse. **Bild 12** zeigt beispielhaft für einen austenitischen korrosionsbeständigen Stahl vom Typ 304 (ähnlich 1.4301 in **Tabelle 15**), dass sich bei Raumtemperatur mit zunehmendem Kaltverformungsgrad Martensit in einem Umfang bildet, wie man es für diesen Werkstoff gemäß **Tabelle 15** vielleicht erwarten könnte. Hingegen ist gemäß **Bild 12** bei einer Umformtemperatur von 50 °C das Ausmaß der Martensitbildung im Vergleich zu der Umformung bei 22 °C erheblich reduziert, auch wenn **Bild 12** hier jeweils zwei unterschiedliche Kurvenverläufe ausweist. Die Darstellung weist aber darauf hin, dass es möglich sein sollte, das Ausmaß der Martensitbildung bei der Kaltverformung und damit auch den Anstieg der magnetischen Permeabilität erheblich zu vermindern, wenn die Kaltverformung bei erhöhter Temperatur, beispielsweise im Bereich zwischen 50 und 100 °C oder noch darüber vorgenommen wird.

3 Häufig gestellte Fragen

Eine Reihe häufig gestellter Fragen zu den magnetischen Eigenschaften nichtrostender Stähle werden nachfolgend aufgeführt und beantwortet:

Frage:

Handelt es sich um Edelstahl, wenn ein Magnet haften bleibt?

Antwort:

Edelstahl Rostfrei kann sowohl unmagnetisch als auch magnetisch sein. Die großen Gruppen der ferritischen, martensitischen und austenitisch-ferritischen korrosionsbeständigen Stähle sind ferromagnetisch, und auch die für allgemeine Verwendung genormten austenitischen Stähle können einen mehr oder weniger starken Magnetismus aufweisen, wenn beispielsweise der Austenit im Zuge einer Kaltverformung in größerem Umfang in Martensit umgewandelt worden ist.

Frage:

Welche austenitischen Edelstähle sind weniger anfällig für eine Magnetisierung durch Kaltverformung?

Antwort:

Weniger anfällig sind die höher legierten Sorten, wie beispielsweise 1.4435 und 1.4567. Gemäß DIN EN 10088-1 kann aber auch die Sorte 1.4404 mit einem erhöhten Nickelgehalt hergestellt werden, um auf diese Weise geringere Permeabilitätswerte zu erzielen.

Frage:

Neigen kohlenstoffärmere austenitische Edelstähle bevorzugt zur Bildung von Verformungsmartensit?

Antwort:

Im Prinzip ja, aber der alleine durch den verminderten Kohlenstoffgehalt erzielte Effekt ist vergleichsweise gering und kann leicht durch beispielsweise einen etwas erhöhten Nickelgehalt kompensiert werden.

Frage:

Wie kann man den Vorgang der Magnetisierung durch eine Kaltverformung wieder umkehren?

Antwort:

Durch eine Lösungsglühung gemäß den in Anhang A zu DIN EN 10088-2 [16] und DIN EN 10088-3 [17] gegebenen Hinweisen. Noch zweckmäßiger könnte es allerdings sein, den unerwünschten Magnetismus von vorneherein dadurch zu vermeiden, dass eine Kaltverformung bei erhöhter Temperatur, beispielsweise im Bereich zwischen 50 und 100 °C oder noch darüber erprobt wird. Es versteht sich, dass dabei auf eine gleichmäßige Anwärmung ohne örtliche Überhitzung geachtet werden muss.

Frage:

Was muss man bei der Bestellung beachten, um einen möglichst unmagnetischen Edelstahl zu erhalten?

Antwort:

Die gängigen austenitischen korrosionsbeständigen Stähle enthalten in der Regel einige Volumenprozent an ferritischen Phasenbestandteilen. Das verleiht diesen Stählen eine erleichterte Gießbarkeit bei der Herstellung und eine verbesserte Schweißbarkeit bei der Verarbeitung, hat aber auch einen geringen Ferromagnetismus der Werkstoffe zur Folge. Will man diesen reduzieren, muss man den Anteil der ferritischen Phasenbestandteile vermindern - mit den entsprechenden Folgen für die Verarbeitbarkeit. Man kann es trotzdem versuchen, indem man Stähle mit hohem Anteil an Austenit bildenden Legierungselementen, insbesondere Nickel spezifiziert. Der erste Schritt kann hier darin bestehen, Edelstähle zu erproben, deren Nickelgehalt jeweils am oberen Ende der durch die Norm DIN EN 10088-1 [1] vorgegeben Analysenspanne liegt. Für einige Sorten sieht diese Norm darüber hinaus vor, dass zur Erzielung niedriger magnetischer Permeabilitätswerte der maximale Nickelgehalt über die Grundnorm hinaus erhöht werden kann, im Fall des austenitischen korrosionsbeständigen Stahls 1.4404 sogar um 1,5 %. Hingewiesen sei hier auch auf die Basler Norm für

den Werkstoff 1.4435, welche für die Produktformen Blech und nahtlose Rohre einen Ferritgehalt von max. 0,2 % und für geschweißte Rohre einen Ferritgehalt von max. 0,5 % fordert, nachzuweisen mittels magnetinduktiver Messgeräte (z.B. Fischer-Ferritscope). Auch die Kaltstauchgüte 1.4567 verspricht auf Grund ihres hohen Kupfergehalts niedrige elektromagnetische Permeabilitätswerte. Einen vollkommen unmagnetischen austenitischen korrosionsbeständigen Stahl kann man erst bei den sehr hoch legierten Sorten wie 1.4539 und 1.4529 erwarten. Für besonders anspruchsvolle Anforderungen an die Nichtmagnetisierbarkeit gibt es die gesonderte Kategorie der nichtmagnetisierbaren Stähle, hier beispielsweise die Sorte 1.3964.

4 Literatur

- [1] **DIN EN 10088-1**, Ausgabe 2005
Nichtrostende Stähle - Teil 1:
Verzeichnis der nichtrostenden
Stähle
- [2] **Edelstahl Rostfrei -
Eigenschaften**
ISER-Merkblatt 821, 4. Auflage,
2006
- [3] **Wikipedia®**
Stichwort Eisen, nach dem Stand
vom 29.11.2011
- [4] Charles J. Novak
**Structure and Constitution of
Wrought Stainless Steels**
Chapter 4 of D. Peckner, I.M.
Bernstein: Handbook of Stain-
less Steels, McGraw-Hill, Inc.
1977, pp. 4-1 to 4-78
- [5] **ASM Specialty Handbook®
Stainless Steels**
Edited by J.R. Davis, Davis & As-
sociates, ASM International, Ma-
terials Park, OH, 1994, Chapter
"Metallurgy and Properties of
Wrought Stainless Steels", p. 13
- [6] W. Heimann
**Einführung in die Werkstoffkun-
de der nichtrostenden Stähle**
in P. Gümpel und 6 Mitautoren:
Rostfreie Stähle, 3. Auflage, ex-
pert-Verl., 2001, S. 8
- [7] P. Lacombe, G. Béranger
Les Aciers Inoxydables
Les Éditions de Physique, 1990,
Chapitre 2: « Structures et dia-
grammes d'équilibre des diver-
ses nuances d'aciers inoxyda-
bles. Conséquences sur leurs
traitements thermiques »
- [8] **Nichtmagnetisierbare Stähle
AMAGNIT®**
Druckschrift 1129/1 der Thys-
sen Edelstahlwerke AG, Ausga-
be Januar 1985
- [9] H. Hattendorf
**Weichmagnetische Werkstoffe
auf Ni-Fe-Basis**
VDM Report Nr. 27, Ausgabe
März 2003
- [10] B. Ilschner
**Werkstoffwissenschaften -
Eigenschaften-Vorgänge-Tech-
nologien**
Springer-Verlag, 1982
- [11] **DIN IEC 60404-1**, Ausgabe 2000
Magnetische Werkstoffe - Teil 1:
Einteilung
- [12] **ASTM 838**, 2002, reapproved
2007
Standard Specification for Free-
Machining Ferritic Stainless Soft
Magnetic Alloy Bar for Relay Ap-
plications
- [13] **Magnetismus und rostfreier
Edelstahl**
Forschungszentrum Ugitech S.A.,
Ugine (F) - 01/2009
- [14] H. Dietrich
**Die magnetischen und mecha-
nischen Eigenschaften magneti-
sierbarer korrosions- und hitze-
beständiger Stähle**
DEW - Technische Berichte, 11.
Band 1971, Heft 1, 42-57 und
Heft 2, 59-70
- [15] D. Fofanov, S. Riedner
**Magnetic properties of stainless
steels: applications, opportuni-
ties and new developments**
Stainless Steel World Confe-
rence 2011, Maastricht, 29 Nov.
- 01 Dec. 2011
- [16] **DIN EN 10088-2**, Ausgabe 2005
Nichtrostende Stähle - Teil 2:
Technische Lieferbedingungen
für Blech und Band aus korrosi-
onsbeständigen Stählen für all-
gemeine Verwendung
- [17] **DIN EN 10088-3**, Ausgabe 2005
Nichtrostende Stähle - Teil 3:
Technische Lieferbedingungen
für Halbzeug, Stäbe, Walzdraht,
gezogenen Draht, Profile und
Blankstahlerzeugnisse aus kor-
rosionsbeständigen Stählen für
allgemeine Verwendung
- [18] F. Fiorillo
**Measurement and Characteriza-
tion of Magnetic Materials**
Academic Press, included in El-
sevier Series in Electromagne-
tism, Amsterdam, 2004
- [19] Diagramm gemäß Angaben
der Ugitech GmbH, Renningen,
2012
- [20] **Werkstoff-Leistungsblatt
1.4044**, Ausgabe März 1981
Nichtrostender Chrom-Vergü-
tungsstahl mit etwa 0,2 C - 17
Cr - 2 Ni - Stangen und Schmie-
destücke
- [21] **SEW 390**, Ausgabe 1991-11
Nichtmagnetisierbare Stähle -
Technische Lieferbedingungen
- [22] **Steels for Oil- and
Gas-Exploration**
Firmenschrift der Deutsche Edel-
stahlwerke GmbH, o. J.
- [23] **Basler Norm BN 2**, Ausgabe
1988-11-10
Nichtrostender Stahl (CrNiMo)
Herausgeber: BCI Basler Chemi-
sche Industrie
- [24] A. van Bennekom, F. Wilke
**Delta-Ferrit-Gehalt bei Werk-
stoff 1.4435 und der Basler
Norm II**
Bericht 2001-4 der Krupp Edel-
stahlprofile
- [25] **Schweißen von Edelstahl Rost-
frei**
ISER-Merkblatt 823, 4. überar-
beitete Auflage, 2004
- [26] **DIN EN ISO 8249**, Ausgabe 2000
Schweißen - Bestimmung der
Ferrit-Nummer (FN) in austeniti-
schem und ferritisch-austeniti-
schem (Duplex-) Schweißgut von
Cr-Ni-Stählen (ISO 8249:2000),
Deutsche Fassung EN ISO
8249:2000
- [27] **AWS A4.2M:2006
(ISO 8249:2000 MOD)**
An American National Standard
Standard Procedures for Cali-
brating Magnetic Instruments
to Measure the Delta Ferrite
Content of Austenitic and Du-
plex Ferritic-Austenitic Stainless
Steel Weld Metal

- [28] K. Nohara, Y. Ono
Composition and grain size dependencies of strain-induced martensitic transformation in metastable austenitic stainless steel
J. of ISIJ 63, 5, 1977. pp. 212-222
- [29] G.L. Huang, D.K. Matlock, G. Krauss
Martensite Formation, Strain Rate Sensitivity, and Deformation Behavior of Type 304 Stainless Steel Sheet
Metall. Trans. A, Vol. 20A, 1989, pp. 1239-1246
- [30] T. Angel
Formation of Martensite in Austenitic Stainless Steels
J. Iron Steel Inst., Vol. 177, 1954, pp. 165-174
- [31] S.S. Hecker, M.G. Stout, K.P. Staudhammer, J.L. Smith
Effects of Strain State and Strain Rate on Deformation-Induced Transformation in 304 Stainless Steel
Part I and Part II, Metall. Trans. A, Vol. 13A, 1982, pp. 619-626, 627-635
- [32] G.B. Olson
Transformation Plasticity and the Stability of Plastic Flow
Deformation, Processing and Structure, G. Krauss, Ed., American Society for Metals, 1984, pp. 391-424



Informationsstelle Edelstahl Rostfrei
Postfach 102205
40013 Düsseldorf
www.edelstahl-rostfrei.de

