Bohrhaken-Material-Kerrosion





von Peter Randelzhofer

Am 8. Mai 1960 zementierte Oskar Bühler in der Talseite des Albrecht Dürer Fels den ersten Bohrhaken in der Fränkischen Schweiz ein, einen selbstgebogenen Haken aus verzinktem Flachstahl in Form einer großen, ringförmigen Öse. Ab Mitte der 1960er-Jahre ersetzte er den verzinkten Flachstahl durch Rundstäbe aus rostbeständigem Chrom-Nickel-Stahl und erfand damit einen Hakentyp, von dem in der Fränkischen Schweiz mittlerweile mehrere Zehntausende stecken und der über die Grenzen des Frankenjuras hinaus als Bühlerhaken bekannt ist.

Als Bauingenieur nutzte er seine beruflichen Kenntnisse, um eine gegenüber Schlaghaken sicherere und dauerhaftere Lösung zu finden, scheute dabei auch den Konflikt mit der extremen Klettergruppe Teufelskralle nicht. Auch heute noch ist der Bohrhaken Gegenstand sportethischer Diskussionen, gleichzeitig aber im Sportklettern fest etabliert. Man möchte meinen, dass der Bohrhaken, ein recht simples und unspektakuläres Stück Technik, seit langem ausgereift ist. Doch weit gefehlt ...



Abb. 1 Umlenkkette im Anlieferungszustand (links) und nach wenigen Monaten am Fels (rechts).

Fotos: Peter Randelzhofer (links), Archiv DAV-Sicherheitsforschung (unten)





Fallbeispiel 1

Ein Mitglied einer süddeutschen Alpenvereinssektion berichtet von Umlenkketten aus österreichischer Produktion, deren Haken bereits nach wenigen Monaten rosteten (Abb. 1). Der Hersteller verwies auf Anfrage darauf, dass es sich um ein rein optisches Problem handle und die Zugfestigkeit ausreichend wäre.

Eine Analyse des Hakenmaterials ergab, dass es sich bei dem verwendeten Stahl um einen einfachen → **ferritischen Baustahl** (→ Infos am Ende des Beitrages unter "Begriffserklärungen") mit ferritisch/perlitischer Mikrostruktur handelt. Diese Stähle können tatsächlich die geforderten Festigkeiten erreichen und werden auch zum Bau von Klettersteigen verwendet, gleichzeitig sind sie aber nicht korrosionsbeständig. Klettersteigverankerungen werden für geringere Lasten ausgelegt als Bohrhaken. Wegen der großen Hebelwirkungen an den Verankerungen sind die Querschnitte deutlich größer als jene von Bohrhaken, was die Gefahr von Versagen durch Korrosion mindert. Zusätzlich werden Klettersteiganker oft durch Verzinkung oberflächlich gegen Korrosion geschützt.

Korrosion und Passivierung

Eisen kommt in der Natur nicht in reiner Form vor, sondern in Form von Eisenerz, einem Gemenge von verschiedenen Eisenoxiden. Unter hohem Energieaufwand wird im Hochofen das Oxid reduziert und

der Werkstoff Stahl gewonnen. Stahl strebt aber danach, mit Sauerstoff eine Verbindung einzugehen und wieder einen Erz ähnlichen, stabilen Zustand zu erreichen. Beim Erhitzen von Stahl sorgen Diffusionsvorgänge dafür, dass sich auf der Oberfläche nicht fest anhaftende Eisenoxidschichten bilden und als Zunder abplatzen. Bei normaler Umgebungstemperatur ist diese Festkörperdiffusion der Eisen- und Sauerstoffatome nicht möglich. Wasser aus der Luftfeuchtigkeit oder allgemein aus der Bewitterung erlaubt zusammen mit dem Sauerstoff aus der Umgebungsluft aber elektrochemische Vorgänge, die ebenfalls zur Bildung von Eisenoxiden führen, dem Rost. Diese Eisenoxide (exakter: Eisenhydroxide) liegen als schwammartige Schicht vor, was bedeutet, dass Wasser adsorbiert wird, gleichzeitig neigt diese Schicht zum Abplatzen. Somit ist bei Bewitterung das Verrosten und Durchrosten ein unvermeidlicher Vorgang. Luftschadstoffe oder salzhaltige Atmosphäre können diese elektrochemischen Vorgänge erheblich beschleunigen.

Das Metall Chrom bildet bei Kontakt mit Sauerstoff auf der Oberfläche sehr schnell eine extrem dünne (etwa fünf Atomlagen), aber dichte und fest anhaftende Chromoxidschicht, die gegenüber Sauerstoff und Wasser weitere Korrosion verhindert. Verwendung findet dieser Effekt z.B. bei verchromten Badezimmerarmaturen oder Autoteilen. Legiert man nun Stahl mit einer gewissen Menge Chrom (mindestens 12 Gew.-%), dann bildet sich auf der Oberfläche eine etwa 50 Atomlagen starke Schicht aus Chrom- und Eisenoxiden, die im Gegensatz zu Rost ebenfalls sehr dicht und fest anhaftend ist. Die Bedingungen für elektrochemische Reaktionen werden dadurch erschwert, der Fachmann spricht von Passivierung.

Abb. 2 Lasche mit einer radialen Bruchfestigkeit von 17,7 kN statt der geforderten 25 kN (unten). Lasche desselben Herstellers zwei Tage nach Setzen in der Halong-Bucht/Vietnam (rechts). Fotos: Archiv DAV-Sicherheitsforschung







Fallbeispiel 2

Mit diesem Wissen fertigte ein italienischer Hersteller Bohrhakenlaschen aus X46Cr13, einem Stahl, der laut Datenblatt wegen des mittleren Kohlenstoffgehaltes von 0,46 Gew.-% ausreichendes Festigkeitspotential besitzt und wegen des mittleren Chromgehaltes von 13 Gew.-% über Korrosionsbeständigkeit verfügen sollte. Ausreißversuche ergaben allerdings Festigkeitswerte deutlich unterhalb der Norm, unter scharfen Korrosionsbedingungen zeigten die Laschen bereits nach zwei Tagen flächigen Korrosionsangriff (Abb. 2).

Eine metallurgische Untersuchung ergab, dass der Stahl weichgeglüht eingesetzt wurde (Abb. 3 li.). Es liegt dann ein → ferritischer Stahl vor, bei dem die plattenförmigen Karbide durch Wärmebehandlung kugelförmig eingeformt wurden, um die → Festigkeit zu verringern und damit eine gute Verarbeitbarkeit zu gewährleisten. Da Kohlenstoff und Chrom eine hohe Affinität zueinander haben, liegen die Karbide nicht in Form von Zementit vor, sondern als Chromkarbide. Damit ist nicht mehr genügend Chrom im Ferrit gelöst, um an der Oberfläche der Lasche eine Passivierungsschicht zu bilden.

Gleichzeitig wurde das Material offensichtlich längere Zeit auf einem ungünstigen Temperaturniveau zwischen 600 und 900 °C gehalten. Zusätzlich zu den Chromkarbiden bildet sich dann die σ -Phase, eine Verbindung aus Eisen und Chrom, die sehr hart und spröde ist und

Abb. 3 Lichtmikroskopische Aufnahme der Struktur des ferritischen Chromstahls mit eingeformten Chromkarbiden (links), die einzelnen Kristallite des Ferrits sind bei dieser Art der Präparation nur schwer an Hand der Schattierung zu erkennen. Rechts eine zeilige Anordnung der kantigen, blockartigen σ -Phase. Bereits bei der Laschenherstellung wurden durch diese kantigen und spröden Phasen Mikrorisse eingeleitet. Fotos: FAU-WTM





die mechanischen Eigenschaften weiter verschlechtert (Abb. 3 re.). Die Lasche hätte nach der Fertigung noch vergütet werden müssen, d.h. → martensitisch gehärtet und → angelassen. Nach dem Abschrecken der martensitischen Härtung bleiben die Kohlenstoff- und Chromatome in den Eisenkristalliten zwangsgelöst. Der Kohlenstoff sorgt dadurch für eine starke Gitterverzerrung und damit für hohe Festigkeit, das Chrom steht für den Korrosionsschutz an der Oberfläche zur Verfügung. Um eine optimale Zähigkeit - eine gute Kombination aus Festigkeit und Verformbarkeit - zu gewährleisten, muss man noch anlassen, d.h. eine moderate Wärmebehandlung durchführen, die den Kohlenstoff-, aber auch den Chromatomen erlaubt zu diffundieren und sich auszuscheiden. Mit zunehmendem Anlassen wird der ferritische Chromstahl also zäher, gleichzeitig sinkt aber die Korrosionsbeständigkeit. Für Verankerungen im Außenbereich ist dieses Material tatsächlich keine gute Wahl.

"Rostfreier Edelstahl"

In dieser Überschrift stecken zwei Missverständnisse: Ein Stahl ist niemals rost- oder korrosionsfrei! Korrosion kann nicht verhindert, sondern je nach einwirkenden Medien nur mehr oder weniger effektiv behindert werden. Rostbeständig oder korrosionsbeständig sind deshalb die besseren Begriffe.

Der Metallurge und die DIN EN-10020 verstehen unter Edelstahl lediglich einen Stahl mit besonderem Reinheitsgrad. Es gibt durchaus Edelstähle, die sehr schnell korrodieren. Der Laie versteht unter Edelstahl einen hochlegierten rostbeständigen Stahl aus der Familie der → austenitischen Chrom-Nickel-Stähle.

Klassischer Vertreter ist der Stahl mit der Kurzbezeichnung X5CrNi18-10. Werkstofftechnologen benutzen gerne diese Art der Kurzbezeichnung, da sie eine erste Information über die Legierungselemente liefert (hier: im Mittel 0,05 Gew.-% Kohlenstoff, 18 Gew.-% Chrom und 10 Gew.-% Nickel). Im Maschinenbau werden gerne Werkstoffnummern angegeben, da hat dieser Stahl die WNr. 1.4301.

Weit verbreitet ist auch die amerikanische Nomenklatur, dort heißt dieser Stahl AISI 304. Trivialnamen für den X5CrNi18-10 und seine Verwandten mit ähnlichen Zusammensetzungen sind V2A, Nirosta oder Inox.

Bereits Oskar Bühler nutzte dieses Material zum Biegen seiner Haken. Der Frankenjura ist damit das größte und älteste Versuchsfeld zum Thema X5CrNi18-10 als Bohrhakenmaterial in korrosiv moderaten Umgebungen (keine salzhaltige Luft durch Meeresnähe, keine starke urbane Luftverschmutzung).

Seit über 50 Jahren werden dort Bühlerhaken gesetzt. Es ist kein Fall von Bohrhakenbruch oder Korrosion bekannt. Einzige Schädigungsmechanismen waren bisher Durchschleifen der Umlenker durch direktes Fädeln zum Ablassen und vereinzelt Probleme mit dem Verbundmörtel. Trotzdem lässt sich vieles falsch machen:



Abb. 4 Umlenkkette #1 aus Süddeutschland und zugehörige lichtmikroskopische Aufnahmen. Der Bruch in Abb. 4b wurde bei Revisionsarbeiten entdeckt. Abb. 4c zeigt den angeätzten Querschliff des Kettengliedes, die Schweißnaht mit ihrer veränderten Mikrostruktur ist gut zu sehen, in der Mitte der Schweißung sind zwei kleinere Bindefehler zu erkennen. Abb. 4d vergrößert einen Ausschnitt der Bruchfläche und Abb. 4e einen Anriss auf der anderen Seite der Schweißnaht. Beide verlaufen durch die Wärmeeinflusszone der Schweißung. Die Aufnahmen 4d und 4e erfolgten am un-geätzten Querschliff, die Risse verlaufen entlang der Kristallitgrenzen.





Fallbeispiel 3

Von Umlenkketten aus X5CrNi18-10 (WNr. 1.4301, AISI 304) eines spanischen Herstellers wurden aus verschiedenen europäischen Ländern Schadensfälle mit dem gleichen Muster gemeldet: Risse in der Nähe der Schweißnaht der Kettenglieder, die Lasche und Ring verbinden.

Die Abb. 4 und 5 zeigen Umlenkketten von einem Kletterturm in einer kleineren süddeutschen Stadt. Zunächst traten Risse und Brüche an den Kettengliedern auf, die direkt in die Laschen montiert waren (Abb. 4a und 4b). Da diese Verbindung fertigungstechnisch am problematischsten ist (Trennen, Biegen und händisches Wiederverschweißen) erging die Empfehlung, diese kritischen Kettenglieder zu überbrücken. Zwei Jahre später tauchten Brüche auch anderer Kettenglieder auf.

Abb. 5a zeigt ein vollständig gebrochenes, Laschen nahes Glied und ein teilgebrochenes, weit aufgebogenes Mittelglied.

In Abb. 4c ist ein Längsschnitt durch den geschädigten Bereich des Kettengliedes zu sehen. Die Schweißnaht ist deutlich zu erkennen, der Bruch (Abb. 4d) und auch ein weiterer Anriss auf der anderen Seite der Naht (Abb. 4e) verlaufen in der Wärmeeinflusszone der Schweißung. Bemerkenswert an diesem und auch an allen anderen Rissen (Abb. 5c bis 5e) ist, dass Bruch bzw. Riss entlang der Korn-

grenzen verlaufen (interkristallin). Normalerweise bricht dieser Stahl durch Versagen quer durch die Körner (transkristallin) und zeigt das typische wabenförmige Bild eines Duktilbruches, d.h. eines Bruches unter hoher lokaler Verformung (Abb. 5b).

Chemische Analysen an geschädigten Kettengliedern in Spanien und England ergaben, dass die Zusammensetzungen entweder am Rand oder knapp außerhalb der Spezifikation für X5CrNi18-10 lagen. Diese Abweichungen betrafen immer kritische Elemente und deren Gehalte lagen immer im ungünstigen Bereich. Konkret heißt das: Chrom war zu wenig enthalten, Kohlenstoff und Phosphor zu viel. Da die ersten Risse in der Wärmeeinflusszone auftraten, liegt der Schluss nahe, dass → **interkristalline Korrosion** das Versagen eingeleitet hat. Durch den Wärmeeintrag beim Schweißen wurde das Chrom an den Kristallitgrenzen in Karbiden gebunden, die Kristallitgrenzen waren dadurch nicht mehr korrosionsbeständig. Für Schweißkonstruktionen wären eher der X2CrNi18-9 (WNr. 1.4307, AISI304L) oder ein ähnlicher kohlenstoffarmer Stahl zu bevorzugen, da diese weniger zur Karbidbildung neigen. Die obersten Kettenglieder sahen fertigungsbedingt den ungünstigsten Wärmeeintrag, sie neigen am meisten zur interkristallinen Korrosion in der Wärmeeinflusszone und brechen deshalb am ehesten. Der gegenüberliegende Schenkel wird überlastet, biegt auf und bricht dann ebenfalls.

An der Umlenkung in Abb. 5 war eine Hintersicherung montiert, die Kletterer verspürten womöglich nur einen unspektakulären Ruck. Die weiteren Kettenglieder korrodieren auf Grund der etwas besse-

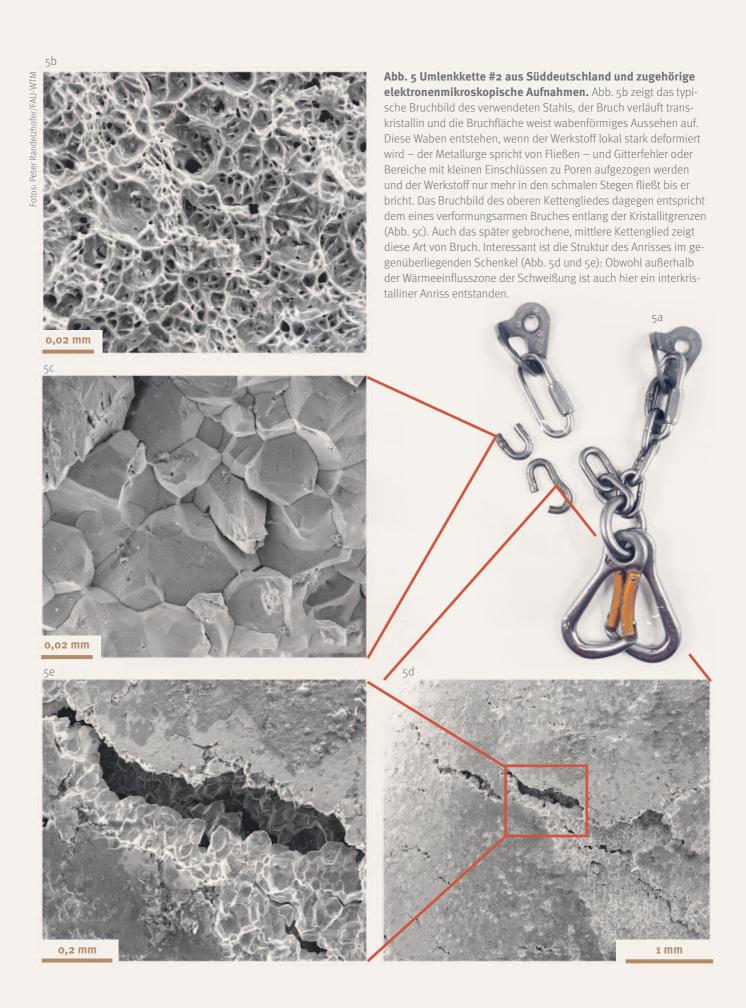


Abb. 6 Links ein angeätzter Querschliff durch die Schweißung eines Kettengliedes, gut sichtbar sind der Bindefehler (Bereich ohne feste Verbindung der beiden Seiten) sowie eine große Pore in der Schmelzzone. Rechts die Bruchstelle eines Kettengliedes, blank der Bindefehler, dunkel die tragende Schweißnaht.

Fotos: FAU-WTM (links), DAV-Sicherheitsforschung (rechts)





ren Mikrostruktur in der Wärmeeinflusszone langsamer, werden dann aber auch überlastet und brechen unter dem gleichen Mechanismus. Die Abb. 5d und 5e erlauben einen Blick in den Anriss, der sich im Schenkel gegenüber dem Bruch unter Überlastung gebildet hat. Obwohl außerhalb der Wärmeeinflusszone der Schweißung gelegen, ist ein interkristalliner Rissverlauf zu erkennen. Erklären ließe sich das mit dem zu hohen Phosphorgehalt, der zur Versprödung der Kristallitgrenzen führt. Der Vollständigkeit halber muss erwähnt werden, dass die Umlenkung in Nähe eines Schwimmbades installiert war, der Einfluss von → **Spannungsrisskorrosion** deshalb nicht kategorisch ausgeschlossen werden kann, auch wenn es unwahrscheinlich scheint. Der beschriebene Schädigungsverlauf ist logisch, sehr wahrscheinlich, aber ein Stück weit doch auch spekulativ. Für zweifelsfreie Klärung bräuchte es erhebliche Anstrengungen im Labor und damit auch großen monetären Aufwand. Die notwendige Qualität an hochortsauflösender Analytik ist selbst im universitären Umfeld nicht selbstverständlich. Und die Frage nach dem detaillierten → **Korrosionsmechanismus** ist tatsächlich mehr eine akademische, denn für den Pragmatiker steht auch so fest: Schlechtes Material erschreckend schlecht verarbeitet! Nachdem zahlreiche dieser Ketten abgebaut wurden, führte die DAV-Sicherheitsforschung Zugversuche daran durch. Das Resultat: von 30 getesteten Kettenabschnitten brachen sieben bei einer Last unterhalb 20 kN (die neue Norm verlangt künftig 25 kN, in der alten Norm war eine Mindestfestigkeit für Verbindungsglieder nicht definiert). Grund für diese Brüche bei relativ geringer Last waren große Bindefehler in der Schweißnaht (Abb. 6).



Norm = Sicherheit?

Für Bohrhaken existiert seit 1996 die Norm EN 959, die 2007 überarbeitet wurde und aktuell durch eine neue Fassung ersetzt wird.

Sowohl die alte als auch die neue Bohrhakennorm geben konstruktive Vorgaben, eine Vorschrift zur Prüfung der Festigkeit sowie die Mindestzugfestigkeiten von 15 kN in axialer und 25 kN in radialer Richtung. Neu ist, dass Verbindungsglieder wie Ketten ebenfalls 25 kN halten müssen. Konstruktionen wie in Fallbeispiel 3 gezeigt werden nicht nur als Umlenker, sondern auch als Standplatz genutzt. Die alte Bohrhakennorm gab zur Werkstoffauswahl nur den Hinweis, dass alle Teile eines Bohrhakens aus denselben Werkstoffen bestehen müssten. Im Anhang fanden sich ein Hinweis zu Risiken von Korrosion unter unterschiedlichen Umgebungsbedingungen und der Appell, dies zu berücksichtigen und die Haken regelmäßig zu überprüfen. Die neue Norm wird an dieser Stelle deutlich konkreter, es werden drei Klassen von Umgebungsbedingungen definiert und einige in Frage kommende Werkstoffe benannt (Abb. 7).

Klasse 3 ist für Indooranwendung gedacht und fordert nur geringen Korrosionsschutz. Es wird allerdings darauf hingewiesen, dass in Sporthallen in der Nähe von Industriegebieten, Schwimmbädern oder dem Meer Anwendung der Bohrhakenklassen 1 oder 2 notwendig sein kann.

Klasse	Umgebung	Werkstoffe
1	Outdoor Aggressive korrosionsfördernde Umgebung, die Spannungsrisskorrosion ermöglicht: - hohe Chloridkonzentration in der Atmosphäre - Temperaturen über 30 °C - Luftfeuchtigkeit 20 bis 70 % - Meersalz und/oder andere Salze z. B. durch Karst - Kalk-/Dolomitgestein - und/oder säurehaltige Umgebung	3.7035 (Titan grade 2) 1.4565 (X2CrNiMnMoNbN25-18-5-4) 1.4529 (X1NiCrMoCuN25-20-7) 1.4547 (X1CrNiMoCuN20-18-7) 1.4539 (X1CrNiMoCu25-20-5)
2	Outdoor Keine Spannungsrisskorrosion zu erwarten.	1.4401 (X5CrNiMo 17-12-2) 1.4404 (X2CrNiMo 17-12-2) 1.4435 (X2CrNiMo 18-14-3) Die bisher weit verbreiteten Stähle 1.4301 (X5CrNi18-10) und 1.4306 (X2CrNi18-10) werden für den Außenbereich ausdrücklich nicht empfohlen.
3	Indoor Keine Spannungsrisskorrosion zu erwarten. (In Sporthallen in der Nähe von Industriegebieten, Schwimmbädern oder dem Meer kann die Anwendung der Bohrhakenklassen 1 oder 2 notwendig sein.)	keine Vorgaben (geringer Schutz vor Korrosion, z.B. Galvanisierung auf Blech, Anodisierung auf Aluminiumlegierung)

Klasse 2 umfasst Outdooranwendungen in Gebieten mit mäßiger Korrosion. Eine zur Entstehung von Spannungsrisskorrosion führende Umgebung ist nicht gegeben. Für die Alpen und die meisten mitteleuropäischen Sportklettergebiete ist diese Klasse ausreichend. Bei den für diese Klasse vorgeschlagenen Stählen handelt es sich ausschließlich um WNr. 1.44xx (Trivialname V4A), also Stähle mit Molybdän-Zugaben, da Molybdän die Passivierung gegen stark oxidierend wirkende Salzlösungen unterstützt.

Mancher mag sich wundern, warum die z.B. im Frankenjura bewährten WNr. 1.43xx (V2A) nicht enthalten sind, aber es macht durchaus Sinn: Bei Klettergebieten nahe Ballungsräumen ist die Gefahr von verstärkter Korrosion durch Luftverschmutzung gegeben, die definierten Stähle verschaffen einen Sicherheitspuffer. Andererseits sind diese Stähle teurer als WNr. 1.43xx, was in manchen Gebieten zu Akzeptanzproblemen der Norm führen könnte.

Klasse 1 ist für Anwendungen in stark korrosionsfördernden Umgebungen gedacht, d.h. an der Küste oder in Küstennähe (Meereswinde können signifikante Salzkonzentrationen weit in das Landesinnere tragen), bei extremer Luftverschmutzung oder ungünstigen Gesteinsarten.

Das in dieser Klasse aufgeführte Titan grade 2 ist den Stählen von der Korrosionsbeständigkeit her weit überlegen und könnte auch einer eigenen Klasse zugeteilt werden. Es ist für tropische Klettergebiete direkt am Meer oft die einzige dauerhafte Lösung. Bei Titan grade 2 handelt es sich um Reintitan mit geringen, definierten Ge-

halten anderer Elemente und einer Obergrenze von 0,18 Gew.-% für im Titangitter gelösten Sauerstoff. Was die Norm nicht leisten kann, ist die konkrete Zuordnung der Bohrhakenklasse zu einem bestimmten Klettergebiet. In vielen Fällen wird die Situation eindeutig sein, in manchen (Grenz-)Fällen wird es zu Fehleinschätzungen kommen. Es wäre vielleicht eine gute Idee, die Bohrhakenklasse in die Haken gut sichtbar einzuprägen, um dem Kletterer die Chance zu geben, die Hakenauswahl nachzuvollziehen. Die Auswahl der Werkstoffe orientiert sich an der allgemeinen Neigung zur

- \rightarrow Spannungsrisskorrosion.
- → **Kontaktkorrosion** darf durch die Vorgabe, für alle Komponenten gleiche Werkstoffe zu benutzen, keine Rolle mehr spielen.
- ightarrow **Flächenkorrosion** kündigt sich langsam und sichtbar an, während Korrosion entlang der Kristallitgrenzen eher tückischer Natur ist.
- → **Interkristalline Korrosion** sollte bei sorgfältiger Fertigung und Qualitätskontrolle keine Rolle spielen, die Erfahrung zeigt aber anderes.

Hier setzt eine Kritik des Verfassers an: man müsste zwischen geschweißten und nichtgeschweißten Konstruktionen differenzieren. Nicht nur, dass bei Fertigung und Qualitätskontrolle immer wieder Fehler passieren werden, die für Klasse 1 definierten Stähle sind nicht ganz einfach zu schweißen und die von den Stahlherstellern empfohlenen Schweißzusatzwerkstoffe verändern die Korrosionseigenschaften in der Schweißnaht.

Eine weitere Kritik ist, dass die Norm zwar schreibt, dass auch andere Werkstoffe geeignet sein können, wenn der Hersteller nachweisen kann, dass ihre Beständigkeit gegen Spannungsrisskorrosion

den für die entsprechende Bohrhakenklasse angegebenen Mindestanforderungen entsprechen oder diese übertreffen. Wie dieser Nachweis erfolgen soll, wird nicht spezifiziert: Reicht eine ausreichende → PREN? Reicht der Nachweis, dass sich das Material in der chemischen Industrie oder in Offshore-Anwendungen bewährt hat? Muss ein gezielter Test erfolgen?

Ein Beispiel: Im Moment drängt der Dualphasenstahl 1.4462 (X2Cr NiMoN22-5-3) auf den Markt. Dieser Stahl verfügt über eine Mikrostruktur, in der gleichzeitig Austenit und Ferrit vorliegen und der nur als bedingt schweißbar gilt (enges Parameterfenster, außerhalb davon zwangsläufig schlechte Ergebnisse). Die PREN liegt an der unteren Grenze der für Klasse 1 vorgeschlagenen Werkstoffe. Der Hersteller weist gutes Korrosionsverhalten mittels eines modifizierten Tests nach der Norm ASTM G123 nach, einem Verfahren zur Bewertung der Spannungsrisskorrosion in siedender angesäuerter Natriumchloridlösung. Dieser für die chemische Industrie gedachte Test ist von den Bedingungen her weit weg von Realbedingungen am Fels.

Die UIAA erarbeitet aktuell einen Salzsprühtest, der mit seinen Testbedingungen eng an unterschiedlichen Realbedingungen liegen soll. Nach ersten, bisher unveröffentlichten Versuchen würden diese Bohrhaken womöglich nicht einmal der Klasse 2 genügen. Dazu muss aber auch angemerkt werden, dass der Salzsprühtest generell kritisch zu sehen ist. Dieser Test wurde entwickelt, um die Korrosionsschutzwirkung organischer Beschichtungen, metallischer Überzüge oder chemischer bzw. physikalischer Oberflächenbehandlun-

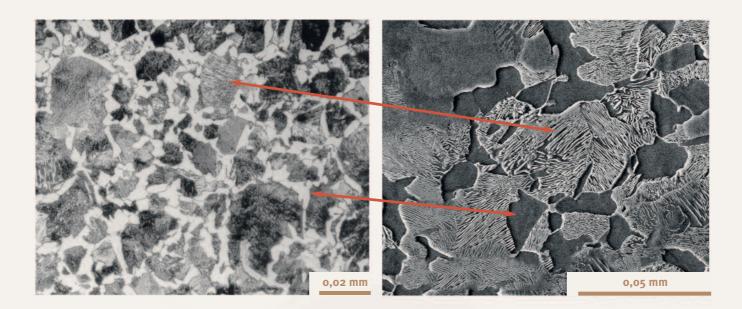
gen zu bewerten. Die zugehörige Norm EN ISO 9227 warnt selbst, dass die Ergebnisse nicht überinterpretiert werden dürfen. Inwieweit die Bemühungen der UIAA-Sicherheitskommission gelingen, einen Salzsprühtest zu entwickeln, der Realbedingungen gut genug abbildet, bleibt abzuwarten.



Fazi

Die neue Bohrhakennorm mit ihrer Differenzierung nach Umgebungsbedingungen und konkreten Werkstoffvorschlägen wird das Bewusstsein für die Problematik Korrosion schärfen und damit zu einer Besserung der Situation führen. Gleichzeitig wird es weiterhin Schadensfälle durch Korrosion geben. Die Norm unterteilt die Werkstoffe nach ihrem Potential für Korrosionsschutz. Dieses Potential kann durch die Verarbeitung deutlich reduziert werden, z.B. ungünstige Wärmeeinträge oder falsche Schweißparameter. Der Einfluss des Oberflächenzustandes auf die Korrosion wurde in diesem Text noch gar nicht diskutiert. Die Sicherheitskommission der UIAA arbeitet gerade an einem eigenen Normvorschlag, der auch einen Korrosionstest vorsieht. Realbedingungen sollen dabei sehr gut abbildet werden können, ein ehrgeiziges aber mögliches Unterfangen. Sinnvoll wären dann nicht Materialtests, sondern Bauteiltests, um Fertigungseinflüsse berücksichtigen zu können.

Abb. 8 Mikrostruktur eines ferritisch/perlitischen Stahls mit 0,45 Gew.-% Kohlenstoff. Links eine lichtmikroskopische, rechts eine elektronenmikroskopische Aufnahme. Durch spezielle Ätzverfahren können der Ferrit und die Lamellen des Perlits sichtbar gemacht werden. Das Rasterelektronenmikroskop bietet eine höhere Auflösung und damit detailreichere Bilder als das Lichtmikroskop. Die weichgeglühte Mikrostruktur eines Stahls mit ähnlichem Kohlenstoffgehalt ist in Abb. 3 zu sehen. Fotos: Peter Randelzhofer/FAU-WTM



Begriffserklärungen



Ferritischer Stahl

Als Stähle werden alle Werkstoffe bezeichnet, die zum überwiegenden Teil aus Eisen bestehen und deren Kohlenstoffgehalt maximal zwei Gewichtsprozent beträgt. Der Kohlenstoffgehalt ist durch die metallurgischen Herstellungsverfahren bedingt (Stichwort Hochofen) und wird teilweise gezielt zur Einstellung von ightarrow Festigkeit und Formänderung genutzt. Wie alle Metalle liegt Stahl in einer kristallinen Struktur vor, beim Ferrit ist das eine kubisch raumzentrierte, d.h. die Eisenatome belegen die Ecken eines Würfels, ein weiteres Eisenatom sitzt in der Raummitte des Würfels. Ein makroskopisches Werkstück, z.B. ein Bohrhaken, besteht aus einer Vielzahl solcher mikroskopischen Kristallite, die an ihren Rändern, den Korngrenzen, über ungeordnete Strukturen verbunden sind. Eine Korn- oder Kristallitgrenze ist also keine Unterbrechung der chemischen Bindungen zwischen den Eisenatomen, sondern nur der Übergang von einem Kristallit zum nächsten. Die Kohlenstoffatome werden auf Zwischengitterplätzen gelöst. Da die kubisch raumzentrierte Struktur nur sehr wenige Kohlenstoffatome lösen kann, scheiden diese sich auch bei sehr geringen Kohlenstoffgehalten aus und liegen dann in Form von Zementit vor.

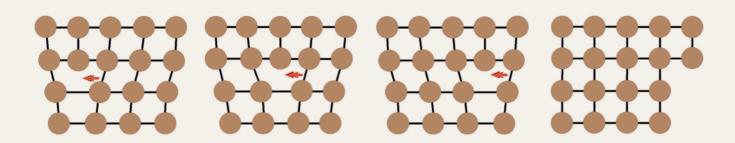
Zementit ist ein Karbid, also kein reiner Kohlenstoff, sondern eine Kohlenstoffverbindung. Zementit hat eine komplizierte Kristallstruktur, die Eisen- und Kohlenstoffatome sitzen auf definierten Gitterplätzen, die atomaren Bindungen sind deutlich stärker als im Eisengitter des Ferrits. Daraus resultiert die hohe Härte und \rightarrow Festigkeit des Karbids. Auf Grund des komplexen Bildungsmechanismus bildet sich bei langsamer Abkühlung der Zementit plattenförmig alternierend mit Ferritplatten aus (Perlit), man spricht von ferritisch-perlitischem Grundgefüge (siehe Abb. 8). Für kohlenstoffärmere Stähle ist das der übliche Anlieferungszustand. Kohlenstoffreiche Stähle werden oft weichgeglüht angeliefert, hier wurde der Zementit durch Glühung kugelförmig eingeformt (siehe Abb. 3). Durch weitere Wärmebehandlungen können \rightarrow Festigkeit und Formänderung manipuliert werden.



Festigkeit und Formänderung

Bei geringen Belastungen wird die Verformung durch Dehnung und Stauchung der Atombindungen getragen, diese Verformung ist reversibel, d.h. nach Entlastung nimmt das Teil wieder seine ursprüngliche Form an (elastische Verformung), wegen der typischen geringen Dehnungen lässt sich das nur bei Biegung mit bloßem Auge beobachten. Überschreitet die Last die sogenannte Dehngrenze, verbleibt nach Entlastung eine Verformung (plastische Verformung). Zu dieser bleibenden Verformung kommt es, wenn Atombindungen

Abb. 9 Versetzungen sind linienförmige Fehler im Kristall an der Stelle, an der eine Gitterebene plötzlich endet. Solche Gitterfehler sind ganz normale Erscheinungen bei Kristallwachstum. Versetzungsbewegung entsteht dadurch, dass sich Atombindungen auf einer Seite der Versetzung öffnen und auf der anderen Seite wieder schließen. Plastische Verformung ist die Überlagerung zahlreicher Versetzungsbewegungen in unterschiedlich orientierten Gitterebenen. Abbildung: Peter Randelzhofer



aufreißen und sich neue wieder schließen. Die Abb. 9 veranschaulicht diesen Mechanismus, der als Versetzungsbewegung bezeichnet wird. Der Widerstand gegen Formänderung und damit die Festigkeit und Härte wird bei Metallen nicht nur durch die Stärke der Atombindungen bestimmt, sondern auch durch die Mechanismen, die Versetzungsbewegungen behindern:

Feinkornhärtung

Korn- oder Phasengrenzen mit ihren Unterbrechungen der geordneten Gitterstrukturen verhindern weitere Versetzungsbewegung. Je kleiner die Kristallite, desto fester ist der Werkstoff. Bei ferritischperlitischen Stählen spielt dieser Mechanismus eine gewisse Rolle, da es sich bei Perlit um eine feine Abfolge von Ferrit- und Zementitplatten handelt. Durch Weichglühen, dem Einformen der Zementitplatten zu kugeligen Strukturen unter Wärmeeinfluss, wird dieser Härtungsmechanismus verringert.

Mischkristallhärtung

Sind im Gitter des Kristallits Fremdatome gelöst, wird dieses Gitter verzerrt und die Versetzungen können sich nur mehr unter höherem Widerstand bewegen. Dieser Mechanismus ist wesentliche Säule der → martensitischen Härtung, bei der sich eine Vielzahl von Kohlenstoffatomen in die Zwischengitterplätze zwängen.

Ausscheidungshärtung

Sehr kleine und fein verteilte Ausscheidungen können von Versetzungen umgangen oder geschnitten werden, dadurch erhöhen sich

Verformungswiderstand und Festigkeit. Bei den hier diskutierten Stählen tritt dieser Mechanismus nur nach moderatem \rightarrow **Anlassen** auf.

Versetzungshärtung (Kaltverfestigung)

Bei starker Kaltverformung bewegen sich eine Vielzahl von Versetzungen durch den Kristall, das Gitter wird zunehmend deformiert und geschädigt, was bedeutet, dass zusätzliche Versetzungen entstehen, die bei ungünstiger Lage die Bewegung anderer Versetzungen behindern.

Austenitische Stähle können durch diesen Mechanismus gut verfestigt werden.

Martensitische Härtung

Ist kein eigenständiger Mechanismus, sondern eine Kombination mehrerer Grundmechanismen. Der ferritische Stahl wird erhitzt und wandelt sich in → **Austenit** um, der Kohlenstoff wird im Eisengitter des Austenits vollständig gelöst. Durch rasches Abkühlen kann sich der Kohlenstoff nicht ausscheiden, er bleibt zwangsgelöst, während sich das Eisengitter zu einer extrem verzerrten raumzentrierten Struktur umwandelt. Die martensitische Härtung lebt im Wesentlichen von der → **Mischkristallhärtung.** Da die Transformation des Eisengitters innerhalb eines Kristallites immer nur in plattenförmigen Bereichen erfolgt, entstehen zusätzlich Korngrenzen ähnliche Bereiche und linienförmige Gitterfehler, also Versetzungen. Martensitische Härtung beinhaltet also immer auch → **Feinkornhärtung** und in einem sehr geringen Maße → **Versetzungshärtung.** In der Regel sind martensitisch gehärtete Stähle zu spröde, um gute Gebrauchseigenschaften zu haben. Das Gitter der Kristallite muss noch etwas

Abb. 10 Diese selfmade Haken wurden im Zuge einer Sanierung entdeckt. Die Bruchkräfte unterboten die Forderung der Norm, der untere Haken hielt einer Belastung von nur 0,5 kN stand, das entspricht nicht einmal dem Körpergewicht eines ausgewachsenen Kletterers. Die Mikrostruktur der Schweißnaht dieses Hakens zeigt Martensit (Bild rechts). Die großen hexagonalen Strukturen markieren die Korngrenzen des Austenits vor der Umwandlung. Im Innern dieser Sechsecke kann man die Struktur der einzelnen Martensitplatten erkennen. Hier wurde irrtümlich ein anderer Stahl verwendet als vom Hersteller angenommen. Es handelt sich um einen Chrom freien, ferritischen Stahl mit 1 Gew.-% Kohlenstoffgehalt. Dieses Material ist nicht korrosionsbeständig und sollte wegen des hohen Kohlenstoffgehaltes nicht geschweißt werden. Bei der Abkühlung aus der Schweißhitze entsteht spröder Martensit. Fotos: Peter Randelzhofer/FAU-WTM



entspannt werden, um eine optimale Zähigkeit - eine gute Kombination aus Festigkeit und Verformbarkeit - zu gewährleisten. Dies geschieht durch **Anlassen**, einer Wärmbehandlung unterhalb der Ferrit-Austenit-Umwandlungstemperatur, die dem Kohlenstoff erlaubt zu diffundieren und sich als feines Karbid auszuscheiden.

Verformbarkeit im kalten Zustand (im Gegensatz zum ferritisch-perlitischen Stahl, der nur im heißen Zustand gut verformt werden kann), Chrom für eine gewisse Korrosionsbeständigkeit. Dazu wird der Stahl während der Herstellung rasch abgekühlt, um das Chrom in Lösung zu halten. Im Gegensatz zum → Martensit ist dadurch aber die Gitterverzerrung nicht sehr hoch, die gute Umformbarkeit leidet nicht.

0,05 mm



Austenitischer Stahl

Erhitzt man den Ferrit, strukturieren sich die Kristallite ab einer bestimmten Temperatur um. Die Eisenatome bilden dann nicht mehr ein kubisch raumzentriertes, sondern ein kubisch flächenzentriertes Gitter. Die Eisenatome belegen neben den Ecken eines Würfels auch die Mitte einer jeden Würfelfläche. Diese Struktur kann deutlich mehr Kohlenstoff lösen als der Ferrit, außerdem ist der Widerstand gegen Versetzungsbewegung geringer. Beides, also das Fehlen von Ausscheidungen und die geänderte Kristallstruktur, führt dazu, dass der Widerstand gegen → Formänderung sinkt. Der Schmied weiß das und bringt den Stahl auf die notwendige Temperatur, bevor er ihn bearbeitet. Durch Zulegieren von Nickel oder geschickten Kombinationen von Nickel und Chrom kann Austenit auch bei tiefen Temperaturen vorliegen. Die Nickel- und Chromatome ersetzen teilweise die Eisenatome im kubisch flächenzentrierten Gitter, Kohlenstoff wird wie beim Ferrit auf Zwischengitterplätzen gelöst. Nickel und Chrom sorgen für eine austenitische Kristallstruktur und damit gute



Korrosionsmechanismen

Flächenkorrosion meint einen gleichmäßigen, flächigen Abtrag durch Korrosion. Typische Beispiele sind in den Abb. 1 rechts und 2 rechts zu sehen. Bei Stählen mit Chromgehalten > 17 Gew.-% kann Flächenkorrosion in aggressiven Medien auftreten. Durch Erhöhen der Chrom- und Nickelgehalte sowie Zulegieren von Molybdän kann die Beständigkeit verbessert werden. Molybdän unterstützt die Passivierung gegen stark oxidierend wirkende Salzlösungen, Zugabe von geringen Mengen Kupfer unterstützt die Beständigkeit weiter.

Kontaktkorrosion kennt man von alten Bohrhaken, deren Bohrdübel, Spreizkonus, Schraube und Lasche aus unterschiedlichen Metallen gefertigt waren. Unter Feuchtigkeit kommt es zu elektrochemischen Vorgängen, in deren Folge der unedlere Werkstoff zersetzt wird. Bereits die alte Bohrhakennorm verlangte deshalb, dass alle Teile eines Bohrhakens aus denselben Werkstoffen bestehen müssen.



Lochfraß und Spaltkorrosion sind phänomenologisch eng verwandt. Unter Mangel von Sauerstoff und gleichzeitiger Anwesenheit z.B. von Chloridionen können Schädigungen in der Passivierungsschicht nicht ausheilen, im Gegenteil, es kommt zu elektrochemischen Reaktionen zwischen der edlen Passivierungsschicht und dem unedlen Substrat. Von Lochfraß spricht man, wenn die Verletzung der Passivierungsschicht "natürliche" Ursachen hat, von Spaltkorrosion, wenn konstruktive Ursachen vorliegen (z.B. unter Dichtungen und Schraubenköpfen). Zur Bewertung der Anfälligkeit eines Stahles für Lochfraß hat sich die PREN (Pitting resistance equivalent number) etabliert. Dabei handelt es sich um eine Wirksumme, die sich aus der chemischen Zusammensetzung des Stahls errechnet und die Legierungselemente Chrom, Molybdän und Stickstoff entsprechend ihrer Wirkung wichtet. Die PREN wird gerne auch benutzt, um die allgemeine Anfälligkeit eines Stahls für Korrosion in erster Näherung zu beurteilen.

Interkristalline Korrosion bedeutet, dass der Korrosionsangriff entlang der Kristallitgrenzen stattfindet. Bei korrosionsbeständigen Stählen kann dieser Mechanismus auftreten, wenn entlang der Kristallitgrenzen keine Passivierung möglich ist. Klassische Ursache ist eine falsche Wärmebehandlung oder eine unsachgemäße Schweißung. Bei zu langsamer Abkühlung bleiben die Chromatome nicht im Eisengitter zwangsgelöst und stehen damit nicht zur Passivierung zur Verfügung, sondern scheiden sich als Chromkarbide aus, wegen der erleichterten Keimbildung bevorzugt an den Korngrenzen. Entlang dieser durch Korrosion vorgeschädigten Bereiche breiten sich

bei Belastung Risse aus. Für Schweißkonstruktionen werden Stähle mit besonders niedrigem Kohlenstoffgehalt und/oder mit Niob bzw. Titan bevorzugt. Bei Anwesenheit von Niob und Titan bilden sich bevorzugt Niob- und Titankarbide, Chrom bleibt gelöst.

Spannungsrisskorrosion kann wie interkristalline Korrosion entlang der Kristallitgrenzen verlaufen, der Mechanismus ist aber ein völlig anderer. Bei der interkristallinen Korrosion liegt eine ungünstige Mikrostruktur vor, Spannungsrisskorrosion tritt bei gewissen Werkstoffen auch bei normaler Mikrostruktur auf. Austenitische Chrom-Nickel-Stähle gehören leider zu dieser Werkstoffgruppe. Eine zweite Voraussetzung ist das Einwirken eines korrosionsfördernden Mediums, v.a. wässrige Lösungen mit Chloridionen. Dritte Voraussetzung ist das Anliegen von Zugspannungen. Auch wenn Bohrhaken und Kettenglieder auch ohne äußere Belastungen gewisse Eigenspannungen aufweisen können (durch Umformung oder Schweißung während der Herstellung) und damit alle Voraussetzungen erfüllt sein könnten, ist die Rolle der Spannungsrisskorrosion bei den in Bsp. 3 erwähnten Brüchen unter Experten umstritten. Bisher konnte in keiner Untersuchung Spannungsrisskorrosion zweifelsfrei nachgewiesen werden, auch wenn in manchem Gutachten anderes behauptet wird. Die typischen Rissverläufe in der Wärmeeinflusszone der Schweißnähte der Schadensfälle aus Deutschland sprechen eher gegen Spannungsrisskorrosion, da nach derzeitigen Stand der Literatur die Risse bei den gegeben Umgebungsbedingungen eher transals interkristallin verlaufen müssten. In tropischen Klettergebieten ist Spannungskorrosion aber der Hauptschädigungsmechanismus.