



HANDBUCH

Sebastian Dießner

Korrosionsschutz in der Seeschifffahrt

Seehafen Verlag

Sebastian Dießner

HANDBUCH

Korrosionsschutz in der Seeschifffahrt

Seehafen Verlag

Vorwort

In der Schifffahrt und in Werftbetrieben werden hohe Anforderungen an den Korrosionsschutz gestellt, da Schiffe und Offshore-Konstruktionen starken Korrosionsbelastungen ausgesetzt sind. Eine zu starke Korrosion kann zum Versagen der Schiffsstruktur führen und birgt ein enormes Kostenpotenzial.

Die Idee zum Handbuch Korrosionsschutz in der Seeschifffahrt entstand vor dem Hintergrund, dass ich selbst vergeblich nach Fachliteratur zu dieser Thematik gesucht habe. Vor allem durch das oft fehlende veranschaulichende Bildmaterial sind die vorliegenden Bücher für den wenig erfahrenen Leser ungeeignet.

Das Handbuch Korrosionsschutz in der Seeschifffahrt stellt die Grundlagen des industriellen und maritimen Korrosionsschutzes vor. Zahlreiche Abbildungen aus der Praxis veranschaulichen die einzelnen Arbeitsschritte, von der Oberflächenvorbereitung über die verschiedenen Beschichtungsmethoden bis hin zur Inspektion. Darüber hinaus liefert das praxisorientierte Handbuch Berechnungsgrundlagen und bezieht international geltende Normen und Standards des Korrosionsschutzes ein.

Das vorliegende Handbuch hilft bei der Beurteilung der Arbeitsergebnisse von Werften, speziell die Qualität des Korrosionsschutzes betreffend. Das Buch kann daher auch als Nachschlagewerk für alle Bereiche des Korrosionsschutzes dienen.

Der Autor dankt Herrn Udo Kloschinski, Herrn Richard Ingram, Frau Dagmar Beerscht sowie Herrn Alexander Schulz für die fachliche Unterstützung. Weiterer Dank gilt der Verlagsleitung der DVV Media Group für die Herausgabe des Handbuchs und dem Lektorat für die Unterstützung.

Elsfleth, im Juni 2016
Sebastian Dießner

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	3
1 Korrosion von Metallen	11
1.1 Allgemeine Grundlagen	11
1.2 Passivität.....	13
1.3 Arten der Korrosion	14
1.3.1 Gleichmäßige Flächenkorrosion	14
1.3.2 Muldenkorrosion	15
1.3.3 Lochkorrosion.....	15
1.3.4 Spaltkorrosion.....	16
1.3.5 Galvanische Korrosion	17
1.3.6 Korrosion mit mechanischer Beanspruchung	18
1.3.7 Selektive Korrosion	18
1.3.8 Mikrobiell induzierte Korrosion (MIC).....	18
1.4 Arten des Korrosionsschutzes	19
1.4.1 Baulicher Korrosionsschutz.....	19
1.4.2 Schutz durch Materialauswahl	20
1.4.3 Schutz durch Beschichtung	20
1.4.4 Kathodischer Korrosionsschutz.....	20
2 Oberflächenvorbereitung	23
2.1 Stahlbauliche Vorbereitung von Oberflächen.....	23
2.1.1 Schweißarten.....	23
2.1.2 Äußere Schweißfehler	25
2.1.3 Innere Schweißfehler.....	25
2.1.4 Stahlbauliche Vorbereitung von Schweißnähten, Kanten und Oberflächen.....	26
2.2 Erkennung und Beseitigung von Oberflächenkontamination.....	33
2.2.1 Kontamination durch Öle und Fette.....	33
2.2.2 Kontamination durch Salze und Sulfate.....	35
2.2.3 Kontamination durch Staub und Dreck	38
2.2.4 Kontamination durch Kondensation/Wasser.....	39
2.2.5 Kontamination durch nicht intakte Beschichtungssysteme	41

2.3	Entrostungsmethoden und Oberflächenbehandlung.....	41
2.3.1	Rostgrade von Stahlplatten nach ISO 8501-1:2007	41
2.3.2	Strahlen	42
2.3.3	Entrostung mit Wasser	50
2.3.4	Mechanische Oberflächenvorbereitung	54
3	Beschichtungsstoffe – Grundlagen.....	59
3.1	Zusammensetzung von Beschichtungsstoffen.....	59
3.2	Generische Beschichtungstypen und deren Klassifizierung nach Aushärtung.....	60
3.2.1	Oxidativ härtende Beschichtungsstoffe	60
3.2.2	Physisch trocknende Beschichtungsstoffe	60
3.2.3	Chemisch härtende Beschichtungsstoffe	61
3.3	Arten der Beschichtungsstoffe	61
3.3.1	Epoxidharz-Beschichtungsstoffe.....	61
3.3.2	Polyurethan-Beschichtungsstoffe.....	62
3.3.3	Polyester-Beschichtungsstoffe	63
3.3.4	Zinkreiche Beschichtungsstoffe.....	63
3.4	Beständigkeit von generischen Beschichtungsstoffen	66
3.5	Kompatibilität von Beschichtungsstoffen untereinander	66
3.6	Shopprimer	68
3.7	Washprimer.....	70
3.8	Datenblätter	70
4	Beschichtungsmethoden und Messverfahren	74
4.1	Beschichtungsmethoden	74
4.1.1	Beschichtung mit Metallen	74
4.1.2	Pulverbeschichtung	76
4.1.3	Flüssige Beschichtungsstoffe.....	78
4.2	Schichtdicken und deren Messung	87
4.2.1	Bestimmung der Nassfilmstärke.....	87
4.2.2	Bestimmung der Trockenfilmstärke	88

5	Beschichtungsdefekte	92
5.1	Beschichtungsdefekte durch Fehler bei der Applikation.....	92
5.1.1	Absacken von Beschichtungsstoff	92
5.1.2	Trockenspray	93
5.1.3	Starke Überbeschichtung und Brechen des Beschichtungsstoffs.....	94
5.2	Blasen- und Lochbildung im Beschichtungsstoff	95
5.3	Schäden durch Rost im Beschichtungssystem	97
5.4	Kohäsion und Adhäsion von Beschichtungen und deren Ablättern	99
5.4.1	Bestimmung der Haftfestigkeit mit der Gitterschnittprüfung.....	101
5.4.2	Bestimmung der Haftfestigkeit mit der Kreuzschnittprüfung	104
5.4.3	Bestimmung von Adhäsion und Kohäsion mittels Abreißversuch.....	107
5.5	Rissbildung innerhalb des Beschichtungsstoffs	110
5.6	Auskreidung von Beschichtungssystemen	111
5.7	Feiertage, Nadelstiche und Hohlräume im Beschichtungsstoff	112
5.7.1	Porenprüfung mit dem Nassschwamm-porenprüfgerät	114
5.7.2	Porenprüfung mit dem Hochspannungsporositätsprüfgerät	115
5.8	Runzeln	116
5.9	Schrumpeln von oxidativ härtenden Beschichtungsstoffen.....	116
5.10	Ausschwitzten von Aminen	117
5.11	Bildung von Kratern.....	117
5.12	Kontamination mit Metallspänen, metallischem Strahlgut und Rostläufern ...	118
5.13	Brandstellen auf Beschichtungssystemen	119
6	Vermeidung von Bewuchs und Fremdorganismen am Schiffskörper	121
6.1	Beschichtung mit selbstpolierendem Antifouling	125
6.2	Beschichtung mit Fouling-Release-Systemen	127
6.3	Antifouling und Treibstoffersparnisgarantien	128
6.4	Schutz vor Bewuchs in Seekastenrohren und Offshore-Installationen.....	129

7	Normen und Gesetze	130
7.1	Systematik der ISO-Normreihe 12944 – Korrosionsschutz von Stahlbauten durch Beschichtungssysteme.....	130
7.2	Korrosionsschutz-Standards	132
7.2.1	Normen für die stahlbauliche Vorbereitung im Schiffbau	132
7.2.2	Normen für die Oberflächenvorbereitung.....	133
7.2.3	Normen zu Beschichtungsstoffen und zur Beschichtungsinspektion	135
7.3	Gesetzliche Grundlagen des PSPC Codes	135
7.4	Gesetzliche Grundlagen der MSC Zirkular 288(87) zum Korrosionsschutz von Ladetanks für Erdöltanker.....	136
7.5	NORSOK M501-Standard für die Offshore-Industrie	136
8	Berechnungen und Ökonomie	137
8.1	Berechnung des Beschichtungsstoffverbrauchs.....	137
8.1.1	Berechnung der Nassfilmschichtstärke	137
8.1.2	Verbrauchsrechnung (Beschichtungsstoff).....	138
8.1.3	Rechenbeispiel zur Verbrauchsrechnung.....	141
8.2	Berechnung von Flächen	143
8.3	Ökonomische Grundlagen zur Wahl eines Beschichtungsherstellers	145
8.3.1	Preisvergleich von ähnlichen Beschichtungsprodukten.....	145
8.3.2	Preisvergleich Antifouling	146
8.3.3	Vergleich von Produkten für eine Dockung	146
8.3.4	Sonstige Faktoren zum Vergleich von Herstellern	147
8.3.5	Fazit zur Wahl eines Beschichtungsherstellers.....	148
8.4	Kostenrechnung für ein Projekt	148
9	Inspektion und Inspektionsparteien	152
9.1	Inspektion bei Neubaufträgen.....	152
9.1.1	Interessen der Parteien bei der Neubauinspektion.....	153
9.1.2	Anmeldung und Durchführung der Inspektionen	154
9.2	Inspektionen bei der Instandhaltung in einer Werft	155
9.3	Qualifikationen von Inspektoren des Korrosionsschutzes	156

10	Spezifikationen	158
10.1	Neubauspezifikation	159
10.2	Instandhaltungsspezifikation für einen Reparaturwerftaufenthalt	168
11	Arbeitssicherheit	170
11.1	Absturzgefahr	170
11.2	Brandgefahr	171
11.3	Gesundheitsgefährdung durch Beschichtungsstoffe und Verdünnung	171
11.4	Sicherheit bei der Oberflächenvorbereitung	171
11.5	Gefahren für die Umwelt	172
12	Praxisbeispiele aus dem Schiffsneubau	173
12.1	Prozesse des Korrosionsschutzes.....	173
12.2	Beschichtung von Tanks	179
12.2.1	Beschichtung von Ballastwassertanks und Leerzellen von Massengutfrachtern nach PSPC Code sowie von zu beschichtenden Bereichen von Rohöltanks nach MSC Zirkular 87	185
12.2.2	Beschichtung von Trinkwassertanks	187
12.3	Beschichtung von Bilgen	187
12.4	Beschichtung des Unterwasserschiffs	188
12.5	Beschichtung von Laderäumen	188
12.6	Beschichtung nach NORSOK M501	188
12.7	Beschichtung in technischen Räumen	189
12.8	Beschichtung von Flächen unter Isolierung	189
13	Reparatur in der Werft.....	191
13.1	Unterwasserschiff.....	191
13.2	Oberwerk und Wechselgang (Boottop)	197
13.3	Beschichtung von Deckflächen	198
13.4	Reparatur von Bilgen.....	200
13.5	Reparatur von Tanks und Laderäumen	201

14	Korrosionsschutzarbeiten durch Besatzungsmitglieder von Schiffen	206
15	Grundlagen der Dokumentation	210
15.1	Dokumentation nach PSPC Code und MSC 288(87) für Neubauten.....	211
15.2	Dokumentation bei Reparaturwerftaufenthalten.....	218
	Stichwortverzeichnis	219
	Der Autor	224

1 Korrosion von Metallen

1.1 Allgemeine Grundlagen

Korrosion ist eine „physikochemische Wechselwirkung zwischen einem Metall und seiner Umgebung, die zu einer Veränderung der Eigenschaften des Metalls führt und häufig zu Beeinträchtigungen der Funktion des Metalls, der Umgebung oder des technischen Systems, von dem diese einen Teil bilden, führen kann“ [1]. In Industrie und Schiffbau wird Stahl eingesetzt. Dieser besteht zum größten Teil aus Eisen und zusätzlich aus geringen Mengen Kohlenstoff, Silizium, Mangan und anderen Legierungselementen. Bei der Produktion von Stahl werden hohe Mengen an Energie aufgewendet. Die Materialien gelangen auf ein höheres Energielevel und sind damit instabiler als der Grundzustand der eingesetzten Werkstoffe. Rost entsteht bei Stahl dadurch, dass die Elemente danach streben, in einen stabilen Zustand zurückzugelangen. Generell ist der Korrosionsprozess abhängig von der Zusammensetzung eines Werkstoffs. Metalle haben die Tendenz, in Kontakt mit Wasser elektrisch geladene Atome frei zu lassen. Je edler ein Metall ist, desto geringer ist diese Tendenz. Zu den edlen Metallen zählen unter anderem Gold und Platin. Unedle Metalle wie Aluminium und Zink lassen entsprechend viele Ionen in Reaktion mit Wasser frei. Bei der Ablösung von Ionen handelt es sich um eine sogenannte Redoxreaktion.

In einer wässrigen Lösung entsteht nach der Ablösung von Ionen eines Metalls nach einer bestimmten Zeit ein elektrisches Gleichgewicht des Metalls mit der Lösung. Dieses Gleichgewichtspotenzial stellt sich ein, wenn die Anzahl der in der Lösung enthaltenen und der sich vom Metall abscheidenden Ionen gleich groß ist. Das Gleichgewicht hängt vom bestehenden Druck, der Temperatur und der Art und Konzentration des Elektrolyten ab.

Die Grenzfläche zwischen Metall und wässriger Lösung (Elektrolyt) wird Elektrode genannt. Für die Messung des Potentials eines Metalls wird eine zweite Elektrode als Vergleichselektrode benötigt. Für gewöhnlich wird zur Messung von Standardpotenzialen zum Vergleich eine Wasserstoffelektrode eingesetzt.

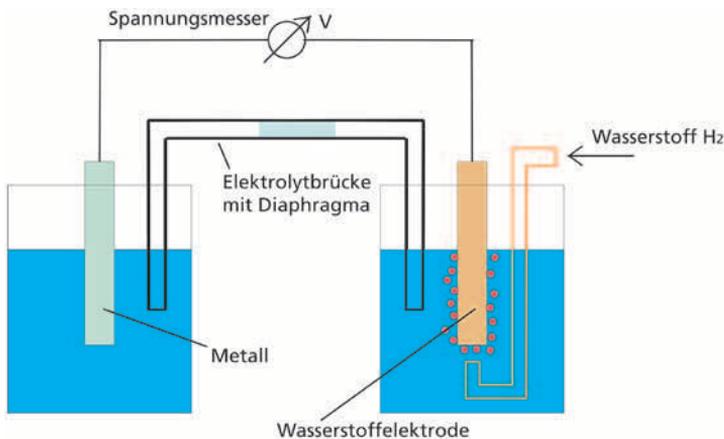


Abb. 1.1: Messanordnung zur Bestimmung von Standardpotenzialen

Aus den in dieser Versuchsanordnung (Abb. 1.1) unter bestimmten Bedingungen gemessenen Spannungen ergibt sich die elektrochemische Spannungsreihe. Diese dient auch der Sortierung der Metalle nach ihren Standardpotenzialen (Tab. 1.1).

Element	Standardpotenzial [V]
Gold	1,42
Platin	1,2
Silber	0,8
Quecksilber	0,79
Kohlenstoff	0,74
Kupfer	0,34
Wasserstoff	0
Blei	-0,12
Zinn	-0,14
Nickel	-0,25
Cadmium	-0,4
Eisen	-0,44
Chrom	-0,71
Zink	-0,76
Mangan	-1,05
Aluminium	-1,66
Magnesium	-2,38

Tab. 1.1: Sortierung der Metalle

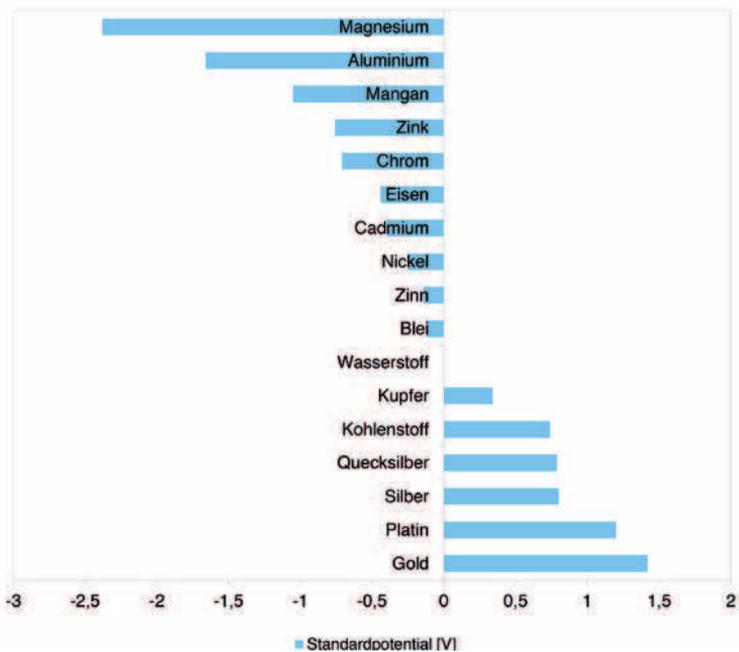


Abb. 1.2: Die elektrochemische Spannungsreihe

Aus der elektrochemischen Spannungsreihe kann die Stellung eines Metalls in Relation zu einem anderen Metall abgeleitet werden (Abb. 1.2). Sie gibt Aufschluss darüber, welches von beiden das edlere Metall (Kathode) und welches das unedlere Metall (Anode) ist. Im Korrosionsschutz in der Seefahrt macht man sich diesen Effekt zunutze. Im Unterwasserschiffsbereich werden in bestimmten Bereichen (z. B. am Ruder oder in Seekästen) Opferanoden angebracht, die oftmals aus Zink bestehen. Das Zink opfert sich dem edleren Stahl in Bereichen, wo das Beschichtungssystem bis zum Stahl beschädigt ist. In diesem Zusammenhang ist auch die galvanische Korrosion zu nennen. Werden zwei Metalle unterschiedlicher Normalpotenziale miteinander verbunden und können diese mit der Umwelt reagieren, so kommt es zu teilweise extremen Korrosionserscheinungen. Im Schiffbau gibt es Bauelemente, wie beispielsweise Masten auf Passagierschiffen, die zum Zwecke der Gewichtsersparnis aus Aluminium gefertigt werden. Es gibt häufig starke Probleme mit Korrosion im Verbindungsbereich der Aluminiumaufbauten mit den Stahlaufbauten in Bereichen, wo das Beschichtungssystem beschädigt ist. Zusätzlich kann der Vergleich mit der Wasserstoffelektrode Auskunft über die Beständigkeit eines Metalls in Säuren geben. Wenn das Metall unedler als die Wasserstoffelektrode ist, wird es in Säuren aufgelöst. Aus diesem Grund werden z. B. Tanks, die starken Säuren ausgesetzt sind, oft auch aus bestimmten Metalllegierungen gefertigt. Bei der Korrosion von Metallen in Säuren wird Wasserstoff freigesetzt.

Je geringer der pH-Wert ist, desto schneller schreitet die Korrosion voran. Bei Metallen findet überwiegend Sauerstoffkorrosion statt. Diese benötigt wässrige Lösungen wie Wasser in der Atmosphäre (Regen, Luftfeuchtigkeit) oder etwa Wasser aus Seen, Flüssen, dem Meer etc. Metalle, die ein Standardpotenzial unter +0,82 V haben, korrodieren in der Regel in wässrigen Lösungen. Eine Einschränkung wäre, wenn das Metall eine Deckschicht bildet, die ein Fortschreiten der Korrosion verringert oder stoppt. Diese Art der Korrosion findet nur an der Grenzfläche von Metall statt. Für die Reaktion wird eine Nachlieferung von Sauerstoff benötigt. Sauerstoffmangel kann die Geschwindigkeit der Korrosion stark vermindern. Aus diesem Grund ist auch das Betreten von abgeschlossenen Laderäumen auf Schiffen, in denen Stahl gefahren wird, gefährlich. Die Korrosion vermindert den Sauerstoffgehalt im Laderaum. Im Schiffbau werden aus diesem Grund verschweißte „tote Räume“ bis zu einer bestimmten Größe genehmigt. Teilweise gibt es bestimmte Pulver, die den Sauerstoffgehalt in einem derartigen Raum zusätzlich vermindern. Nach dem Verschließen eines Totraums soll Korrosion durch Sauerstoffmangel minimiert werden. In der Atmosphäre korrodieren Stähle für gewöhnlich ab einer relativen Luftfeuchtigkeit von über 60 %.

In einem Stück Metall können sich werkstoffbedingt unterschiedliche Korrosionselemente befinden. Die zumeist hohe elektronische Leitfähigkeit innerhalb des Metalls begünstigt dabei die Korrosion. So kann es innerhalb eines Metallstücks verschiedene Anoden und Kathoden geben. Je nachdem, um welches Metall es sich handelt, sieht dessen Korrosion unterschiedlich aus. Stahl korrodiert wegen des hohen Eisenanteils zu Rost. Das Korrosionsprodukt von Kupfer ist der sogenannte Grünspan. Das Korrosionsprodukt von Zink hingegen sieht weiß aus (Weißrost).

1.2 Passivität

Obwohl einige Metalle unedel sind, gelten diese als besonders korrosionsbeständig. Dies liegt daran, dass sie unter bestimmten Umständen aus ihren Korrosionsprodukten eine Schutzschicht bilden, die eine weitere Korrosion verhindert. Aus diesem Grund wird bei der Herstellung von korrosionsbeständigen Stählen, wie Edelstahl, als Element der Legierung Chrom und/oder Nickel hinzugefügt.

Um eine Korrosionsbeständigkeit von passiviertem Metall zu erhalten, muss die Passivschicht erhalten bleiben. So eignet sich sogenannter V2A-Edelstahl nicht als unbeschichteter Stahl für den Einsatz in Seeluftbereichen. Das Salz in der Luft zerstört die Passivschicht und begünstigt Lochfraß oder Spannungsrisse. Aus diesem Grund wird V4A-Edelstahl an Bord von Schiffen eingesetzt, wenn dieser unbeschichtet der Seeluft ausgesetzt werden soll. Um die Passivschicht nicht zu zerstören, ist in diesem Fall darauf zu achten, dass zum einen eine galvanische Trennung vom Schiffskörper besteht. Zum anderen dürfen keine Eisenprodukte die Passivschicht zerstören. In Werften oder an Bord wird die Passivschicht von Edelstahl oftmals leicht durch kleine Stahlspäne von Schleifarbeiten angegriffen. Es entsteht punktuelle Korrosion.

Generell sind Oberflächenverunreinigungen von nicht rostenden Stählen zu vermeiden. Dazu gehören Fette, Farbpartikel, Schweißspritzer und Fremdstoffe und je nach Legierung chloridhaltige Medien (z. B. Meerwasser) und Anlaufarben.

Es gibt auch wetterfeste Stähle mit Kupferanteilen. Diese werden unter anderem für Kunstobjekte verwendet. Sie bilden eine tief rostrote Korrosionsschicht. Diese verhindert eine weitere Korrosion des Metalls. Allerdings sind diese Stähle nicht meerwasserbeständig und können insofern nicht in der Seefahrt angewendet werden. Zu beachten ist, dass die Konstruktion abtrocknen können muss. Es dürfen sich keine dauerhaften Wasserablagerungen bilden.

1.3 Arten der Korrosion

Nachfolgend werden die häufigsten Korrosionsarten im Schiffbau dargestellt:

1.3.1 Gleichmäßige Flächenkorrosion

Durch den molekularen Aufbau von Metallen gibt es einen ständigen Wechsel von Anoden und Kathoden auf der Oberfläche des Metalls. Es kommt zu einer gleichmäßigen Korrosion an der Oberfläche. Entsprechend korrodiert das Material nahezu gleichmäßig, was zu einem Materialabtrag führt (Abb. 1.3).



Abb. 1.3: Gleichmäßige Flächenkorrosion

Je nach Umweltbedingungen und Materialeigenschaften ist die Korrosionsgeschwindigkeit unterschiedlich. Es lässt sich jedoch meistens ein Abtrag des Materials, gemessen in Millimeter pro Jahr, abschätzen.

1.3.2 Muldenkorrosion

Die Muldenkorrosion ist eine Sonderform der Flächenkorrosion. Unregelmäßigkeiten in der Materialzusammensetzung bewirken einen unregelmäßigen Angriff an der Oberfläche. Es bilden sich entsprechend Mulden (Abb. 1.4). Auch können diese an Stellen entstehen, an denen die Beschichtung defekt ist.

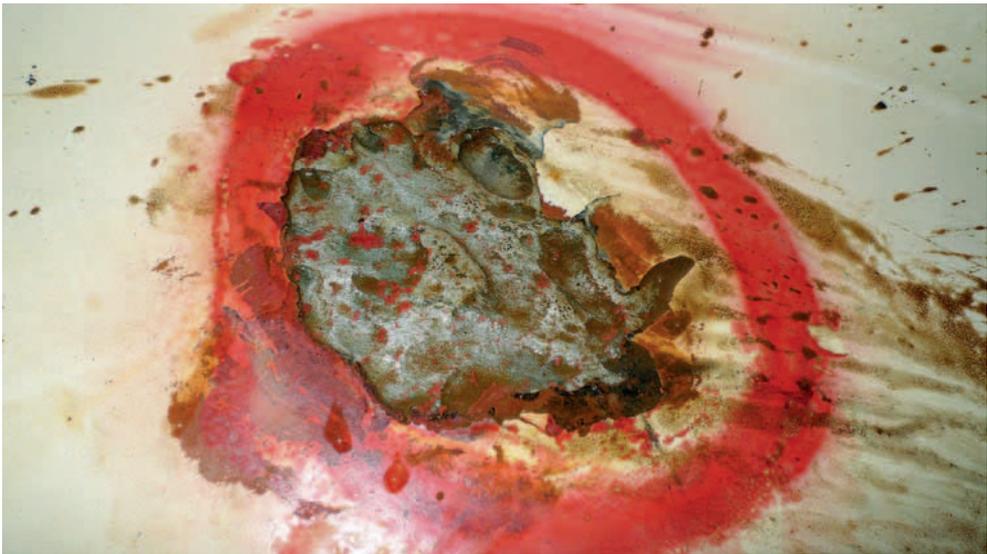


Abb. 1.4: Muldenkorrosion

1.3.3 Lochkorrosion

Die Ursache für Lochkorrosion kann unterschiedlicher Natur sein. Bei Passivschichten kommt es darauf an, ob diese elektrisch leitend sind. Sind sie elektrisch leitend, so findet schnell Lochfraß an Beschädigungen der Passivschicht statt. In die dort gebildeten Löcher gelangt weniger Sauerstoff als an die Außenfläche. Dies behindert eine Repassivierung in dem entstandenen Loch. Insofern konzentriert sich dort die Korrosion und schreitet schnell voran. Auch ist es möglich, dass verschiedene Stellen eines Beschichtungssystems auf einer Oberfläche isoliert voneinander beschädigt sind. Befinden diese sich dann in einem Elektrolyten, so findet an den Stellen der Beschädigung Lochfraß statt (Abb. 1.5). Dieses Problem betrifft auf Schiffen insbesondere regelmäßig befüllte Tanks wie z. B. Ballasttanks, Bilgewassertanks, Bilgen und Schwarzwassertanks.



Abb. 1.5: Lochkorrosion, gut sichtbar nach Strahlen der betroffenen Oberfläche

1.3.4 Spaltkorrosion

Spaltkorrosion kommt häufig in Bereichen vor, wo sich baulich bedingt durch einen Spalt Wasser ablagern kann und das Beschichtungssystem nicht intakt ist (Abb. 1.6). Um diese Art der Korrosion zu verhindern, müssen Spalten in Umgebungen mit einer Luftfeuchtigkeit von über 40% baulich vermieden werden.



Abb. 1.6: Spaltkorrosion

1.3.5 Galvanische Korrosion

Galvanische Korrosion wird auch Kontaktkorrosion genannt. Sie entsteht, wenn zwei Metalle unterschiedlichen Potenzials in der elektrochemischen Spannungsreihe miteinander verbunden sind und diese sich in korrosiver Umgebung befinden.



Abb. 1.7: Galvanische Korrosion eines Aluminiumaufbaus auf Stahl

Abb. 1.7 zeigt einen Mast eines Schiffs, der aus Aluminium gefertigt und mit dem Stahl des Schiffs verschweißt worden ist. Durch Beschädigungen des Beschichtungssystems opfert sich das unedlere Aluminium dem Stahl und korrodiert entsprechend schnell.



Abb. 1.8: Edelstahlschrauben in Aluminiumlegierung und in Stahl

Unter Umständen ist es möglich, Metalle unterschiedlichen Potenzials zu verbinden, wenn der Potenzialunterschied nur geringfügig ist. Dabei ist zu beachten, dass das edlere Metall eine geringere Masse hat als das unedle bei der Verbindung. Als Beispiel wurde hier eine Schraubverbindung mit Edelstahl und eine Aluminiumlegierung gewählt. Umgekehrt würden Aluminiumschrauben in einer Edelstahlkonstruktion (sie sind wegen der geringeren Festigkeit auch nicht geeignet) schnell korrodieren.

In Abb. 1.8 sind die Edelstahlschrauben der Konstruktion nicht galvanisch getrennt von der Aluminiumkonstruktion. Die Edelstahlschrauben werden aber sehr wohl mit Kunststoff galvanisch von dem Stahl getrennt, der in der Abbildung mit rotbräunlichem Shopprimer beschichtet ist.

1.3.6 Korrosion mit mechanischer Beanspruchung

Bei mechanisch starker Beanspruchung von Bauteilen und Schweißnähten kann es Rissbildungen innerhalb des Metalls oder der Schweißnaht geben. Unter anderem kommt dies oft in Doppelbodentanks unterhalb der Laderäume vor. Ist schon ein Angriff durch Korrosion vorhanden und die Struktur geschwächt, so können Risse in den Spanten unterhalb der belasteten Flächen entstehen. Auch können Schiffsverbände an Blockstößen durch Torsion im Seegang oder in Bereichen des Propellers und ungünstigen Schwingungsbereichen zu Rissen insbesondere bei Schweißnähten führen. Diese Risse sind im Anfangsstadium selten mit bloßem Auge sichtbar. Entsprechend muss in Bereichen, wo eine Rissbildung vermutet wird, eine Rissprüfung durchgeführt werden. Dort, wo die Rissbildung optisch möglich ist, muss in Begutachtung mit der Klassifikationsgesellschaft Metall getauscht werden.

1.3.7 Selektive Korrosion

Bei der selektiven Korrosion lösen sich unedlere Legierungselemente aus den edleren Legierungselementen heraus. Dadurch kann die Konstruktion porös werden. Wenn man den Werkstoff durchtrennt, erkennt man in den Bereichen, wo die selektive Korrosion stattfindet, eine Verfärbung des Metalls. Selektive Korrosion kann man von außen selten erkennen. Sie kann ein Grund dafür sein, dass Rohrleitungen, z. B. aus Kupferlegierungen, undicht werden oder ihre Festigkeit verlieren. Ein Beispiel ist das Entzinken einer Kupfer-Zink-Legierung. Als Gegenmaßnahme kann ein wirksames Beschichtungssystem oder kathodischer Schutz verwendet werden. Alternativ kann ein anderer Werkstoff für den Rohr- oder Behälterbau eingesetzt werden.

1.3.8 Mikrobiell induzierte Korrosion (MIC)

Bei mikrobiell induzierter Korrosion werden Werkstoffe durch Mikroorganismen angegriffen (Abb. 1.9). Diese Art der Korrosion wird oftmals durch die Stoffwechselprodukte von Mikroorganismen ausgelöst. Diese Stoffwechselprodukte können starke Säuren sein, die dann die Korrosion verstärken und auch zu Lochfraß führen. Stehendes Wasser begünstigt diese Korrosionsart.



Abb. 1.9: Mikrobiell induzierte Korrosion im Ballastwassertank

1.4 Arten des Korrosionsschutzes

Es gibt verschiedene Möglichkeiten, Korrosion zu vermindern und zu vermeiden. Dazu gehören:

- Baulicher Korrosionsschutz
- Schutz durch Materialauswahl
- Schutz durch Beschichtung
- Kathodischer Schutz

1.4.1 Baulicher Korrosionsschutz

Ein wichtiges Element ist der bauliche Korrosionsschutz, wie er auch in der jeweils gültigen Form der ISO-Norm 12944-3 behandelt wird. Durch passende Konstruktions- und Baumaßnahmen wird dabei der Korrosionsschutz optimiert.

Folgenden Ansprüchen muss dabei ein Bauwerk entsprechen:

- Die Oberflächenvorbereitung und die Möglichkeit der Beschichtung müssen durch eine entsprechende Konstruktion gewährleistet sein. Dazu gehören die nötige Zugänglichkeit und Mindestabstände, um die Arbeiten durchführen zu können.
Mit der Form und Konstruktion eines Bauwerks kann die Korrosionsanfälligkeit vermindert werden. So sind Wasseransammlungen und Wasserfallen zu verringern, und, wenn dies konstruktiv nicht möglich ist, Abflussmöglichkeiten zu schaffen.
- Spalte bei Verbindungen sollten entsprechend nur in Bereichen zulässig sein, die nicht oder sehr geringfügig korrosiv sind.
- Spalte, Ketten- und Punktschweißungen sowie Schraubverbindungen sollten möglichst nur in Bereichen, wo die Gefahr von Korrosion geringfügig ist, angewendet werden. Ansonsten ist eine durchgehende Verschweißung von Metall zu bevorzugen.

- Oberflächenfehler durch Schweißverbindungen, wie Poren und lose Schweißspritzer, sind zu vermeiden. Auch sollten scharfe Kanten gebrochen oder bestenfalls gerundet werden. Oberflächenfehler werden zum einen in Schiffbaustandards und zum anderen in der ISO 8501-3 behandelt. Sogenannte unzugängliche „Toträume“ sind zu vermeiden. Ansonsten sollten unzugängliche Räume frei von Sauerstoff und Feuchtigkeit gehalten werden. Vor dem Verschluss gibt es zur Vermeidung von Korrosion Mittel, die in den Raum eingebracht werden können, um den Sauerstoff zu absorbieren.
- Kontaktkorrosion bzw. galvanische Korrosion ist zu vermeiden. Wenn dies nicht möglich ist, sollten Schweißverbindungen gemäß der ISO 8501-3 dem Vorbereitungsgrad P3 entsprechen und mit Beschichtungsmitteln eine Barriere zur korrosiven Umgebung geschaffen werden. Bei Schraubverbindungen gibt es spezielle Trennscheiben aus Kunststoffen, die die Metalle voneinander trennen.
- Im Rohrbau sollten turbulente Strömungen durch das Design verringert und vermindert werden. Auch sollten 90°-Bögen vermieden werden. In diesen Bögen ist durch die sich ergebenden Strömungen ein besonders hoher Materialabtrag zu erwarten.

1.4.2 Schutz durch Materialauswahl

Je nach Umgebung kann ein Schutz vor Korrosion auch durch die passende Materialauswahl gewährleistet werden. So besteht die Möglichkeit, bei Schiffen Lüftungsgitter aus V4A-Edelstahl fertigen zu lassen. Es ist wichtig, gerade in der stark korrosiven Umgebung von Meerwasser, Metalle zu verwenden, deren Passivschicht nicht durch Salzwasser angegriffen wird. Eine weitere Optimierung kann dann durch Beschichtung des jeweiligen Werkstoffs erreicht werden. Ein weiteres Beispiel sind Rohrleitungen in Tanks und deren Halterungen. Je nach Medium im Tank und in Rohrleitungen können Überlegungen getroffen werden, diese in andere Materialien als Stahl einzubringen. So kann gegebenenfalls das Einbringen von Rohrleitungen aus einer passenden Edelstahllegierung mit Rohrhalterungen aus selbigem Material von Vorteil sein.

1.4.3 Schutz durch Beschichtung

Im Schiffbau sind zwei Arten des Schutzes durch Beschichtung möglich. Zum einen gibt es Beschichtungsmittel, die eine Barriere zwischen dem zu schützenden Element und dessen korrosiver Umwelt aufbauen. Im Schiffbau werden hierfür vorwiegend zweikomponentige Epoxidbeschichtungsmittel verwendet. Zum anderen gibt es Beschichtungsmittel, von denen sich Anteile des Stoffs galvanisch opfern und eine Barriere aufbringen. Hierzu gehören die zinkreichen Beschichtungsmittel Zink-Epoxy und Zinksilikat. Der Zink-Anteil kann in diesen Beschichtungsmitteln über 80 % betragen. Dies ist nicht zu verwechseln mit durch Aluminiumpigmente angereicherten Beschichtungsmitteln. Der Aluminiumanteil liegt hier unter 10 % und dient einer erhöhten Barriere insbesondere gegenüber Wasser.

1.4.4 Kathodischer Korrosionsschutz

Der kathodische Korrosionsschutz funktioniert ausschließlich dort, wo das zu schützende Metall in einem flüssigen Medium ist. Dies ist bei Schiffen für gewöhnlich das Unterwasserschiff, kann aber auch Tanks oder Ballastwassertanks betreffen.

Das Grundprinzip ist, dass das zu schützende Metall zu der Kathode gemacht wird, welche nicht korrodiert. Dies kann dadurch geschehen, dass dem Metall laufend Elektronen über eine

Fremdstromanlage zugefügt werden. Diese Vorgehensweise wird bei Schiffen meistens im Unterwasserschiffsbereich eingesetzt.



Abb. 1.10: Fremdstromanlage

In Abb. 1.10 sieht man die elliptische Anode und die verhältnismäßig kleine Referenzzelle. Die Referenzzelle ist für die Überwachung der Fremdstromanlage notwendig. Zusätzlich müssen Propeller, Propellerwelle und das Ruder geerdet sein. Für gewöhnlich ist bei den meisten Schiffen eine Anode und Referenzzelle im Heckbereich jeweils spiegelsymmetrisch auf Backbord- und Steuerbordseite. Es kommt aber je nach Schiffsgröße vor, dass es im Bugbereich oder auch auf die Schiffsseiten verteilt mehrere Anoden und Referenzzellen gibt.

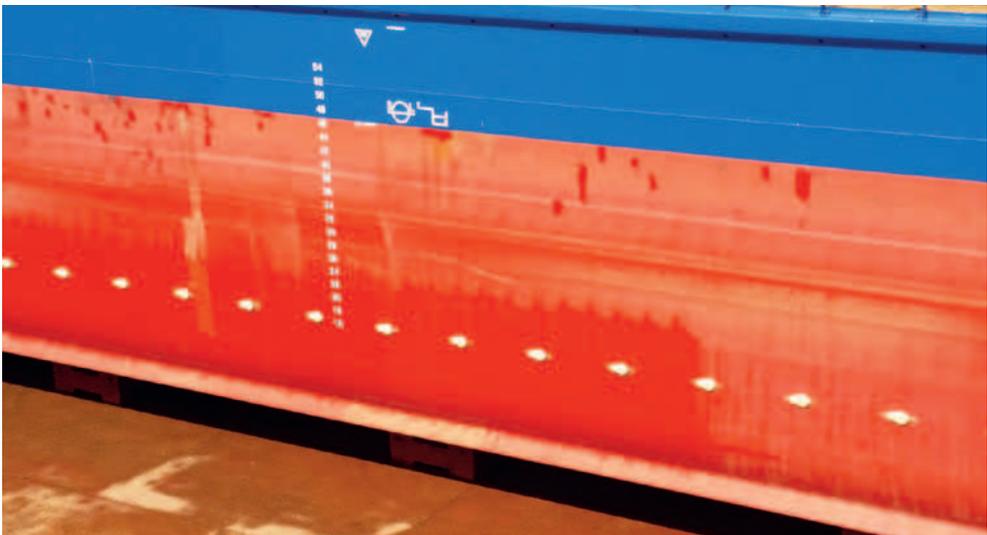


Abb. 1.11: Zinkanoden im Unterwasserschiffsbereich

Bei Schiffen ist der Einbau einer Fremdstromanlage generell eine betriebswirtschaftlich ratsame Investition, um das beschichtete Unterwasserschiff langfristig vor starker Korrosion zu schützen. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, dass ein unedleres Metall, wie Zink oder Aluminium, als Opferanode mit dem Metall verbunden wird (Abb. 1.11). Die Zinkanoden schützen das Unterwasserschiff. Bei Schiffen mit Fremdstromanlage werden Zink- oder Aluminiumanoden häufig am Ruder, im Bereich der Bugstrahler oder in Seekästen eingesetzt. Bei jeder Dockung wird dann entschieden, welche Anoden erneuert werden müssen. Dabei sollen Anoden und Fremdstromanlage im Falle von Beschädigungen durch Beschichtung (Beschädigungen der Beschichtung) vor einer verstärkten Korrosion schützen. Zink- oder Aluminiumanoden können auch in Ballasttanks mit anfänglichen Beschädigungen im Beschichtungssystem ein schnelles Fortschreiten der Korrosion verhindern.

Literatur

[1] Fertigungsstandard des Deutschen Schiffbaus. 7. Auflage 2006.

2 Oberflächenvorbereitung

Bevor eine Oberfläche beschichtet werden kann, muss sie entsprechend vorbereitet werden.

Dies beinhaltet:

- korrekte bauliche Vorbereitung im Stahlbau (Entfernung von scharfen Kanten, Beseitigung von Schweißspritzern etc.)
- Freiheit von Kontaminationen (Fette, Öle, Feuchtigkeit, Salze, Staub, Dreck etc.)
- Befreiung von Rost und Erzeugung von Oberflächenrauigkeit

Die Oberflächenvorbereitung hat starke Auswirkungen auf die Lebensdauer eines Korrosionsschutzsystems. Entsprechend muss sehr sorgfältig entschieden werden, welche Schritte zur Oberflächenvorbereitung notwendig sind und welche Art der Entrostung gewählt wird. Eine falsche Vorbereitung kann schnell zu Bläschenbildung, Adhäsionsfehlern, Abplatzung von Beschichtung oder Rostbildung unterhalb der Beschichtung führen.

2.1 Stahlbauliche Vorbereitung von Oberflächen

Je nachdem, welche Belastungen ein Beschichtungssystem und eine Oberfläche aushalten müssen, gibt es unterschiedliche stahlbauliche Maßnahmen.

Dieses Kapitel beschreibt die im Schiffbau üblichen Schweißmethoden und geht auf die verschiedenen Vorbereitungsgrade der ISO 8501-3:2006 „Vorbereitung von Stahloberflächen vor dem Auftragen von Beschichtungsstoffen – Visuelle Beurteilung der Oberflächenreinheit – Teil 3: Vorbereitungsgrade von Schweißnähten, Kanten und anderen Flächen mit Oberflächenunregelmäßigkeiten“ ein.

2.1.1 Schweißarten

Im Schiffbau und bei Offshore-Anlagen kommen vorwiegend zwei Schweißarten vor: das Schweißen mit Stabelektroden und das Metallschutzgasschweißen. Das Schweißen mit Stabelektroden gehört zur Gruppe des Lichtbogenschweißens. Das Metallschutzgasschweißen wird in das Metallaktivgasschweißen, im Folgenden MAG-Schweißen genannt, und in das Metallinertgasschweißen, im Folgenden MIG-Schweißen genannt, unterteilt. Zusätzlich gibt es das Wolframinertgasschweißen, das sogenannte WIG-Schweißen. Diese Schweißart wird eingesetzt, wenn Schweißnähte in einer sehr hohen Qualität gefertigt werden müssen, z. B. im Rohrbau. Wenn die Schweißnaht von außen aufgebaut wird, ergibt sich durch das WIG-Schweißen eine sehr glatte Schweißnaht im Rohrinternen. Dadurch werden Verwirbelungen von Medien innerhalb eines Rohrs vermieden, die zu einem Materialabtrag führen können.

2.1.1.1 Lichtbogenhandschweißen

Beim Lichtbogenhandschweißen wird durch einen elektrischen Lichtbogen, der zwischen einer Stabelektrode und dem Werkstück brennt, eine Schweißnaht erzeugt. Dafür wird das Werkstück mit einer Schweißstromquelle über eine Klemme elektrisch leitend verbunden. Die Stabelektrode wird von der Schweißstromquelle mit einer großen Stromstärke von 15–500 A und einer Spannung von 15–100 V gespeist. Sie ist über einen Elektrodenhalter, den der Schweißer bedient, mit der Schweißstromquelle verbunden. Wenn die Stabelektrode das Werkstück berührt, entsteht ein Kurzschluss. Dieser erwärmt die Spitze der Stabelektrode so stark,

dass Elektronen austreten können. Es entsteht eine hochoverhitzte Gassäule, die den Lichtbogen darstellt. Es wird Material von der Stabelektrode auf das Werkstück aufgetragen. Beim Lichtbogenhandschweißen entsteht dabei auf der Schweißnaht durch die schmelzende Stabelektrodenumhüllung feste Schlacke. Die Schlacke ist umgehend zu entfernen. Lichtbogenhandschweißen kommt in der Praxis nur bei kleinen Schweißarbeiten zum Einsatz, da es im Vergleich zum MAG-Schweißen verhältnismäßig langsam durchzuführen ist. Auch ist die Oberfläche einer MAG- oder MIG-Schweißnaht weitaus gleichmäßiger.

2.1.1.2 Metallaktivgas- und Metallinertgasschweißen

Beim MAG- und MIG-Schweißen wird ein Metalldraht in einer Schutzgashülle mit einem Lichtbogen als Schweißnaht auf einem Werkstück aufgebracht.

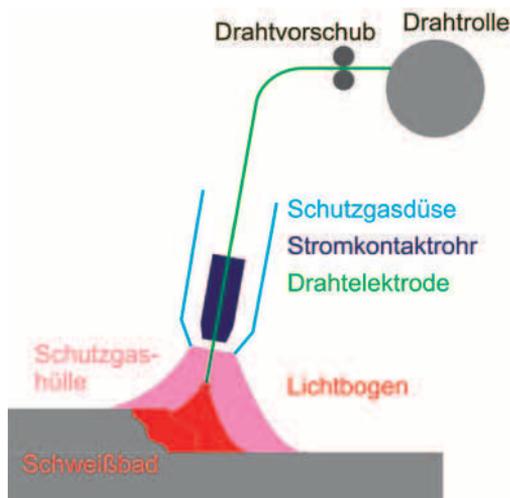


Abb. 2.1: Verfahrensprinzip des Metallschutzgasschweißens

Die in Abb. 2.1 grün dargestellte Drahtelektrode liefert den Werkstoff für die Schweißnaht. Sie wird automatisch über eine Drahtrolle nachgeführt. Die Schutzgashülle, in Rosa dargestellt, umgibt das Schweißbad und verhindert die Oxidation durch den Sauerstoff in der Umgebungsluft. Dadurch entsteht keine Schlacke. Die Zeit, die für die Herstellung der Naht gebraucht wird, ist erheblich kürzer als beim Schweißen mit einer Stabelektrode.

MAG- und MIG-Schweißen unterscheiden sich aufgrund des eingesetzten Schutzgases voneinander. Beim MAG-Schweißen können folgende Schutzgase eingesetzt werden:

1. Schutzgas Argon mit 18 % Kohlendioxid gemischt
2. Schutzgas Argon mit 8 % Sauerstoff gemischt
3. Schutzgas CO_2

Je nachdem, welches Schutzgas in welchen Mischverhältnissen eingesetzt wird, beeinflusst dies die Entstehung von Schweißspritzern, Poren in der Schweißnaht durch Gaseinschlüsse und die Beschaffenheit der Oberfläche der Schweißnaht. MAG-Schweißen wird für unlegierte und niedriglegierte Stähle eingesetzt. MIG-Schweißen wird für hochlegierte Stähle, Nichteisenmetalle und Aluminiumlegierungen eingesetzt. Das Gas ist inert, also reaktionsträge, insofern geht es keine chemischen Reaktionen ein. Als Gase kommen Argon und Helium zum Einsatz.

2.1.2 Äußere Schweißfehler

Äußere Schweißfehler werden bei der Stahlbaukontrolle inspiziert. Im Bau von Schiffen und Offshore-Anlagen sind diese, wenn es sich um Strukturen des Schiffs oder der Anlage handelt, auch klasserelevant. Die Besichtigung des Stahlbaus zusammen mit einem Inspektor der Klassifikationsgesellschaft, die den Bau begleitet, ist für die Abnahme relevant.



Abb. 2.2: Beispiel für eine gute Schweißnaht

Die Schweißnaht ist fehlerfrei. Sie ist weder zu hoch, noch geht die Wurzel zu tief.



Abb. 2.3: Große Wurzelüberhöhung

Die Wurzel steht hier zu weit heraus. In der Praxis können dafür hergestellte Klebestreifen mit Keramikformen auf die Wurzelseite des Materials geklebt werden. Diese sorgen dafür, dass sich die Wurzel nicht überhöht und sich die Schweißnaht in die Keramikform setzt.



Abb. 2.4: Große Nahtüberhöhung

Die Naht ist zu hoch aufgetragen. Eine zu hohe Naht ist für den Korrosionsschutz insofern negativ, dass sich an den Seiten zu geringe Schichtdicken beim Applizieren aufbauen lassen. Außerdem kann sich Sediment in den Ecken besser ablagern.



Abb. 2.5: Nicht durchgeschweißte Naht

Die Naht ist nicht komplett durchgeschweißte. Das Material ist nur an der Oberfläche verbunden. Dies ergibt eine instabile Verbindung. Aus diesem Grund werden die Kanten von zwei Werkstücken oft so angeschliffen, dass sich ein Trichter in V-Form bildet. In diesen Trichter wird die sogenannte „V-Naht“ geschweißt.



Abb. 2.6: Nahtunterwölbung

Die Schweißnaht wölbt sich nach unten. Es wurde nicht ausreichend Material aufgetragen.



Abb. 2.7: Einbrandkerben

Einbrandkerben können durch die Hitze beim Schweißen entstehen. Entlang der Schweißnaht bilden sich kleine Kerben im Material. Diese sind durch erneutes Schweißen wieder zu füllen.

2.1.3 Innere Schweißfehler

Innere Schweißfehler sind von außen nicht sichtbar. Bei einer visuellen Inspektion können sie also mit bloßem Auge nicht erkannt werden. Um innere Schweißfehler zu finden, werden bei relevanten Schweißnähten Ultraschall- und Röntgenuntersuchungen durchgeführt. Dies geschieht stichprobenartig, unter anderem bei Verschweißungen der Außenhülle im Unterwasserschiffbereich.

Das **Handbuch Korrosionsschutz in der Seeschifffahrt** stellt die Grundlagen von Korrosion und deren Prävention für alle Bereiche des Korrosionsschutzes im Stahlbau vor. Es veranschaulicht die verschiedenen Korrosionsarten und deren Ursachen und beschreibt die Methoden der Oberflächenvorbereitung und Beschichtung. Darüber hinaus liefert es Anhaltspunkte zur Identifikation von Beschichtungsdefekten und zur Vermeidung von Bewuchs am Schiffskörper. Dabei nimmt es Bezug auf international geltende Normen und Gesetze. Mit einer Vielzahl von Abbildungen sowie Checklisten für die einzelnen Inspektionsschritte wird der aktuelle Standard im Korrosionsschutz praxisnah dargestellt.

Das Nachschlagewerk richtet sich an Schiffsmechaniker in der Ausbildung, Studierende der Fächer Schiffbau, Nautik und Schiffstechnik sowie technische Offiziere und Inspektoren. Darüber hinaus dient es allen beteiligten Parteien des Korrosionsschutzes in den Bereichen Offshore, Industrie und Stahlbau als Informationsquelle.

Der Autor ist Beschichtungsinspektor (FROSIO Level III) und verfügt über vielseitige Erfahrungen im Korrosionsschutz, vom Schiffsneubau über die Schiffsreparatur im Dock bis hin zur Wartung an Bord.

ISBN 978-3-87154-555-9



9 783871 545559