

DIN EN 17243

ICS 47.020.30; 77.060

Einsprüche bis 2018-10-03

Entwurf
Kathodischer Schutz der inneren Oberflächen von metallischen Tanks, Strukturen, Ausrüstung und Rohrleitungen die Meerwasser enthalten; Deutsche und Englische Fassung prEN 17243:2018

Cathodic protection of internal surfaces of metallic tanks, structures, equipment, and piping containing seawater;

German and English version prEN 17243:2018

Protection cathodique des surfaces internes des réservoirs, ouvrages, équipements et tuyauteries métalliques contenant de l'eau de mer;

Version allemande et anglaise prEN 17243:2018

Anwendungswarnvermerk

Dieser Norm-Entwurf mit Erscheinungsdatum 2018-08-03 wird der Öffentlichkeit zur Prüfung und Stellungnahme vorgelegt.

Weil die beabsichtigte Norm von der vorliegenden Fassung abweichen kann, ist die Anwendung dieses Entwurfs besonders zu vereinbaren.

Stellungnahmen werden erbeten

- vorzugsweise online im Norm-Entwurfs-Portal von DIN unter www.din.de/go/entwuerfe bzw. für Norm-Entwürfe der DKE auch im Norm-Entwurfs-Portal der DKE unter www.entwuerfe.normenbibliothek.de, sofern dort wiedergegeben;
- oder als Datei per E-Mail an nmp@din.de möglichst in Form einer Tabelle. Die Vorlage dieser Tabelle kann im Internet unter www.din.de/go/stellungnahmen-norm-entwuerfe oder für Stellungnahmen zu Norm-Entwürfen der DKE unter www.dke.de/stellungnahme abgerufen werden;
- oder in Papierform an den DIN-Normenausschuss Materialprüfung (NMP), 10772 Berlin, Burggrafenstr. 6, 10787 Berlin.

Die Empfänger dieses Norm-Entwurfs werden gebeten, mit ihren Kommentaren jegliche relevanten Patentrechte, die sie kennen, mitzuteilen und unterstützende Dokumentationen zur Verfügung zu stellen.

Gesamtumfang 113 Seiten

DIN-Normenausschuss Materialprüfung (NMP)

Nationales Vorwort

Dieses Dokument (prEN 17243:2018) wurde vom Technischen Komitee CEN/TC 219 „Kathodischer Korrosionsschutz“ erarbeitet, dessen Sekretariat von BSI (Vereinigtes Königreich) gehalten wird.

Für die deutsche Mitarbeit ist der Arbeitsausschuss NA 062-01-78 AA „Kathodischer Korrosionsschutz“ im DIN-Normenausschuss Materialprüfung (NMP) verantwortlich.

Um Zweifelsfälle in der Übersetzung auszuschließen, ist die englische Originalfassung beigelegt. Die Nutzungsbedingungen für den deutschen Text des Norm-Entwurfes gelten gleichermaßen auch für den englischen Text.

Für die in diesem Dokument zitierten internationalen Dokumente wird im Folgenden auf die entsprechenden deutschen Dokumente hingewiesen:

ISO 15609-1 siehe DIN EN ISO 1509-1

Nationaler Anhang NA (informativ)

Literaturhinweise

DIN EN ISO 1509-1, *Anforderung und Qualifizierung von Schweißverfahren für metallische Werkstoffe — Schweißanweisung — Teil 1: Lichtbogenschweißen*

Kathodischer Schutz der inneren Oberflächen von metallischen Tanks, Strukturen, Ausrüstung und Rohrleitungen die Meerwasser enthalten

Protection cathodique des surfaces internes des réservoirs, ouvrages, équipements et tuyauteries métalliques contenant de l'eau de mer

Cathodic protection of internal surfaces of metallic tanks, structures, equipment, and piping containing seawater

ICS:

Deskriptoren

Dokument-Typ: Europäische Norm

Dokument-Untertyp:

Dokument-Stage: CEN-Umfrage

Dokument-Sprache: D

STD Version 2.9d

Inhalt

	Seite
Europäisches Vorwort	4
Einleitung	5
1 Anwendungsbereich	6
2 Normative Verweisungen.....	6
3 Begriffe	6
4 Qualifikation des Personals	8
5 Allgemeine Betrachtungen	8
5.1 Zu schützende Anlagen und Anlagenteile	8
5.2 Werkstoffe	8
5.3 Umwelt.....	9
5.4 Sicherheit und Umweltschutz	9
5.4.1 Allgemeines	9
5.4.2 Entstehung gefährlicher Gase	9
5.4.3 Freisetzung von gasförmigem Wasserstoff	10
5.4.4 Entstehung von gasförmigem Chlor	10
5.4.5 Entleeren und Öffnen	10
6 Kriterien für den kathodischen Korrosionsschutz	10
6.1 Allgemeines	10
6.2 Kohlenstoff-Mangan-Stähle	11
6.3 Nichtrostende Stähle und Nickellegierungen.....	11
6.4 Gefahr der Rissbildung durch Überschutz.....	12
7 Auslegung	12
7.1 Ziele.....	12
7.2 Auslegungsparameter	13
7.2.1 Allgemeines	13
7.2.2 Unterteilung der zu schützenden Oberflächen.....	14
7.2.3 Bei Berechnungen zu berücksichtigende effektive Oberflächen.....	14
7.2.4 Berechnung des Strombedarfs beschichteter Oberflächen.....	15
7.2.5 Berechnung des Strombedarfs unbeschichteter Oberflächen	16
7.2.6 Schutzstromdichte für unbeschichtete Kohlenstoff-Mangan-Stähle	16
7.2.7 Schutzstromdichte für nichtrostende Stähle und Nickellegierungen	17
7.3 Anwendungen für bestimmte Anlagenteile.....	17
7.3.1 Rohrleitungssysteme.....	17
7.3.2 Rohrbündelkondensatoren und Wärmetauscher.....	18
7.3.3 Filter.....	18
7.3.4 Zeitlich begrenzt eingesetzte Systeme für die hydrostatische Druckprüfung von Tanks unter Verwendung von Meerwasser	19
7.3.5 Gründungspfeiler von Offshore-Windkraftanlagen	19
8 Systeme mit galvanischen Anoden	19
8.1 Typ, Größe, Form und Anzahl der Anoden	19
8.2 Auswahl des Anodenwerkstoffs.....	20
8.3 Reduzierung des Treibpotentials durch einen Widerstand oder eine Diode.....	20
8.4 Anzahl und Abmessungen der Anoden	22
8.5 Positionen der Anoden und Montage	23

8.5.1	Allgemeines	23
8.5.2	Tanks und Anlagen mit ebenen Oberflächen	23
8.5.3	Rohre	26
8.6	Auswahl, Positionierung und Montage von Anoden in Ballasttanks in der unmittelbaren Umgebung von anderen Tanks, in der explosive Gasgemische auftreten können	28
9	Fremdstromsysteme	28
9.1	Allgemeines	28
9.2	Positionen der Anoden und Montage	30
9.2.1	Allgemeines	30
9.2.2	Tanks und Anlagen mit ebenen Oberflächen	30
9.2.3	Rohre	31
10	Inbetriebnahme, Betrieb und Instandhaltung	34
10.1	Allgemeines	34
10.2	Messverfahren und Überwachung	34
10.3	Inbetriebnahme und Leistungsbeurteilung	36
10.4	Betrieb und Instandhaltung	36
10.5	Ziele	36
10.6	Fremdstromsystem	37
10.7	Systeme mit galvanischen Anoden	38
Anhang A (informativ) Umweltcheckliste		39
Anhang B (informativ) Leitfaden zu Auslegungswerten des kathodischen Korrosionsschutzes der Innenflächen von mit Meerwasser gefüllten Anlagenteilen		41
B.1	Typische Auslegungswerte für kathodische Stromdichten	41
B.1.1	Anfangsauslegungsstromdichte	41
B.1.2	Erhaltungsauslegungsstromdichte	42
B.2	Beschichtungsreduktionsfaktor von Schutzbeschichtungssystemen	42
Anhang C (informativ) Berechnung der Potentialverteilung innerhalb einer Rohrleitung oder eines Rohrs		43
C.1	Potentialverteilung innerhalb einer Rohrleitung (ohne Berücksichtigung des Anodenwiderstands)	43
C.2	Potentialverteilung innerhalb einer Rohrleitung (unter Berücksichtigung des Anodenwiderstands)	44
C.3	Potentialverteilung innerhalb eines Rohrs	45
Anhang D (informativ) Auslegung von Systemen mit galvanischen Anoden		46
D.1	Gleichungen zur Berechnung des Anodenwiderstands	46
D.2	Berechnung des Anodenwiderstands am Ende der Nutzungsdauer	47
D.2.1	Allgemeines	47
D.2.2	Berechnung des Anodengewichts am Ende der Nutzungsdauer	47
D.2.3	Berechnung der Anodenmaße am Ende der Nutzungsdauer	47
D.3	Elektrolytlösungswiderstand	48
D.4	Stromabgabe galvanischer Anoden	50
D.5	Nutzungsdauer der Anoden	51
D.6	Anforderungen an das Mindestnettogewicht	51
Anhang E (informativ) Typische elektrochemische Merkmale von Fremdstromanoden		52
Anhang F (informativ) Auslegung von Systemen mit Fremdstromanoden		53
F.1	Kathodischer Korrosionsschutz für die Innenflächen von Tanks	53
F.2	Bewertung der Längenänderung einer für den kathodischen Korrosionsschutz in fließendem Wasser verwendeten Anode	54
Literaturhinweise		56

Europäisches Vorwort

Dieses Dokument (prEN 17243:2018) wurde vom Technischen Komitee CEN/TC 219 „Kathodischer Korrosionsschutz“ erarbeitet, dessen Sekretariat von BSI gehalten wird.

Dieses Dokument ist derzeit zur CEN-Umfrage vorgelegt.

Einleitung

Metallische Anlagen, die Meerwasser oder Brackwasser enthalten, unterliegen der Korrosionsgefahr. Auch wenn eine Beschichtung zur Reduzierung dieser Gefahr vorhanden ist, wird in der Regel ein kathodischer Korrosionsschutz verwendet, um während der Auslegungslbensdauer der Anlage eine Korrosionskontrolle sicherzustellen. Besonders wichtig ist dies beim Vorhandensein von galvanischen Kopplungen zwischen unterschiedlichen Metallen und Legierungen, da die Korrosion in diesem Fall in der Hauptsache den weniger edlen Werkstoff betrifft.

Die Funktionsweise des kathodischen Korrosionsschutzes beruht auf einem ausreichend starken Gleichstrom, der auf die Innenfläche der in Kontakt mit Wasser stehenden Anlagen geleitet wird, um die Werte für das Metall-Elektrolyt-Potential so zu verändern, dass die Korrosionsgeschwindigkeit vernachlässigbar ist.

Allgemeine Grundlagen und theoretische Aspekte des kathodischen Korrosionsschutzes im Meerwasser sind in EN 12473 ausführlich beschrieben.

1 Anwendungsbereich

Dieses Dokument legt die Anforderungen und Empfehlungen für kathodische Korrosionsschutzsysteme fest, die auf Innenflächen von metallischen Tanks, Anlagen, Anlagenteilen und Rohrleitungen, die unbehandeltes oder behandeltes Meerwasser oder Brackwasser enthalten, angewendet werden, um dort einen wirksamen Korrosionsschutz zu bieten.

Der kathodische Korrosionsschutz von Frischwassersystemen fällt nicht in den Anwendungsbereich dieses Dokuments. Dies wird von EN 12499 abgedeckt.

ANMERKUNG EN 12499 enthält Informationen zum kathodischen Korrosionsschutz von Innenflächen in allen Arten von Wasser, einschließlich allgemeiner Aspekte für Meerwasser, jedoch ausschließlich industrieller Kühlwassersysteme. Dieses Dokument beschreibt gezielt Anwendungen in Meerwasser und Brackwasser.

2 Normative Verweisungen

Die folgenden Dokumente werden im Text in solcher Weise in Bezug genommen, dass einige Teile davon oder ihr gesamter Inhalt Anforderungen des vorliegenden Dokuments darstellen. Bei datierten Verweisungen gilt nur die in Bezug genommene Ausgabe. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments (einschließlich aller Änderungen).

EN 12473, *Allgemeine Grundsätze des kathodischen Korrosionsschutzes in Meerwasser*

EN 12496, *Galvanische Anoden für den kathodischen Schutz in Seewasser und salzhaltigem Schlamm*

EN 12499, *Kathodischer Korrosionsschutz für die Innenflächen von metallischen Anlagen*

EN 13509, *Messverfahren für den kathodischen Korrosionsschutz*

EN ISO 8044, *Korrosion von Metallen und Legierungen — Grundbegriffe (ISO 8044)*

EN ISO 9606-1, *Prüfung von Schweißern — Schmelzschweißen — Teil 1: Stähle (ISO 9606-1)*

EN ISO 15607, *Anforderung und Qualifizierung von Schweißverfahren für metallische Werkstoffe — Allgemeine Regeln (ISO 15607)*

ISO 15609-1, *Anforderung und Qualifizierung von Schweißverfahren für metallische Werkstoffe — Schweißanweisung — Teil 1: Lichtbogenschweißen (ISO 15609-1)*

3 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die Begriffe nach EN ISO 8044 und EN 12473 und die folgenden Begriffe.

ISO und IEC stellen terminologische Datenbanken für die Verwendung in der Normung unter den folgenden Adressen bereit:

— IEC Electropedia: unter <http://www.electropedia.org/>

— ISO Online Browsing Platform: unter <http://www.iso.org/obp>

3.1 Anodenredundanzfaktor
Multiplikator, der auf die theoretische Anzahl von Anoden angewendet wird, die erforderlich ist, um bei Beschädigungen oder Ausfällen von Anoden den Korrosionsschutz zu erhalten, ohne dass das Stückgewicht der Anoden verändert wird

3.2

kathodischer Korrosionsschutzbereich

Teil der Anlage, der hinsichtlich des kathodischen Korrosionsschutzes separat betrachtet werden kann

3.3

Beschichtungsreduktionsfaktor

f_c

Verhältnis der kathodischen Stromdichte eines beschichteten metallischen Werkstoffs zur kathodischen Stromdichte des Werkstoffs ohne Beschichtung

3.4

kritisches Spaltpotential

Potential, bei dem für eine bestimmte Umgebung und Spaltgeometrie keine Gefahr für den Beginn einer Spaltkorrosion besteht

3.5

Treibpotential

Differenz zwischen dem Anlage-Elektrolyt-Potential und dem Anode-Elektrolyt-Potential, wenn der kathodische Korrosionsschutz in Betrieb ist

3.6

Überschutz

Ereignis, bei dem die Anlage-Elektrolyt-Potentiale negativer sind als für einen zufriedenstellenden kathodischen Korrosionsschutz nötig

Anmerkung 1 zum Begriff: Überschutz hat keine sinnvolle Funktion und kann aufgrund von Wasserstoffversprödung und Ablösung der Beschichtung möglicherweise sogar Beschädigungen der Anlage, z. B. Rissbildung, hervorrufen.

Anmerkung 2 zum Begriff: Wird häufig inkorrekt als „übermäßiger Schutz“ bezeichnet.

3.7

Freiraumfaktor

u_f

Verhältnis der Oberfläche eines Tanks, die in Kontakt mit Wasser stehen kann, zur gesamten Oberfläche

Anmerkung 1 zum Begriff: Wenn die gesamte Oberfläche benetzt werden kann, gilt $u_f = 1$.

3.8

Benetzungsfaktor

k

Bruchteil der Auslegungslebensdauer, während dem die Innenflächen eines Tanks oder einer Anlage in Kontakt mit Wasser stehen

Anmerkung 1 zum Begriff: Wenn der Tank dauerhaft mit Wasser gefüllt ist, gilt $k = 1$.

Anmerkung 2 zum Begriff: Bei wechselnden Bedingungen kann ein Durchschnittswert verwendet werden.

Anmerkung 3 zum Begriff: Wird auch als Beladungsfaktor bezeichnet [1].

3.9

Wasserstoffversprödung

Vorgang, bei dem die Aufnahme von Wasserstoff zu einer Verminderung der Zähigkeit oder Duktilität eines Metalls führt

3.10

wasserstoffinduzierte Spannungsrissbildung

WSR

(en: hydrogen stress cracking, HSC)

Rissbildung aufgrund von in einem Metall vorhandenem Wasserstoff sowie Zugspannung (Eigen- und/oder aufgebraute Spannung)

Anmerkung 1 zum Begriff: WSR beschreibt die Rissbildung in Metallen, die durch Wasserstoff, der durch kathodische Polarisation entsteht, verspröden kann, wobei nachteilige Auswirkungen durch bestimmte Chemikalien, z. B. Sulfide, nicht auftreten.

4 Qualifikation des Personals

Das Personal, das für Planung, Beaufsichtigung der Installation, Inbetriebnahme, Beaufsichtigung des Betriebs, Messungen, Überwachung sowie die Beaufsichtigung der Wartung von kathodischen Korrosionsschutzsystemen zuständig ist, muss für die durchzuführenden Aufgaben angemessen qualifiziert sein. Diese Qualifikation sollte von unabhängigen Personen bewertet und dokumentiert werden.

EN ISO 15257 legt ein geeignetes Verfahren zur Beurteilung und Zertifizierung der Qualifikation von Personal für den kathodischen Korrosionsschutz fest, das verwendet werden darf.

Die für die durchgeführten Aufgaben angemessene Qualifikation von Personal für den kathodischen Korrosionsschutz sollte durch eine Zertifizierung in Übereinstimmung mit EN ISO 15257 oder durch ein anderes, gleichwertiges Präqualifikationsverfahren nachgewiesen werden.

5 Allgemeine Betrachtungen

5.1 Zu schützende Anlagen und Anlagenteile

Diese Europäische Norm gilt für die Innenflächen von Ballasttanks, über- oder unterirdischen Lagertanks einschließlich Löschwassertanks, für Filter, wie z. B. Kiesfilter, für Wärmetauscher und Kondensatoren, für geflutete Bereiche von Hafen- und Schleusentoren sowie für Küstenschutzbauten, Dalben und Fundamente von Offshore-Windkraftanlagen.

Diese Europäische Norm gilt für unter Wasser liegende Außenbereiche von Zubehörteilen und anderen, innerhalb von Tanks angebrachten, autarken Anlagenteilen, wie z. B. Pumpen und Rohrleitungen, wenn diese nicht elektrisch von der Anlage getrennt sind. Sie gilt auch für Anlagenteile, die in die Anlage integriert sind, wie z. B. Versteifungen.

Diese Europäische Norm gilt außerdem für den kathodischen Korrosionsschutz des Inneren von Rohrleitungen für Meerwasser oder Brackwasser, einschließlich Armaturen, Pumpen und Formstücken. Bei den letztgenannten Anwendungsfällen sind zusätzliche Betrachtungen hinsichtlich der Auslegung und der Montage des kathodischen Korrosionsschutzsystems erforderlich.

Diese Europäische Norm gilt auch für vorübergehend eingesetzte kathodische Korrosionsschutzsysteme, die zum Schutz vor Korrosion durch Meerwasser oder Brackwasser verwendet werden, wenn die Systeme einer hydrostatischen Druckprüfung unterzogen werden und wenn sie vor der Inbetriebnahme und dem Betreiben von Tanks oder anderen Anlagenteilen gelagert werden.

5.2 Werkstoffe

Diese Europäische Norm gilt für den kathodischen Korrosionsschutz von Anlagen, die hauptsächlich aus unbeschichteten oder beschichteten Kohlenstoff-Mangan-Stählen hergestellt sind.

Diese Europäische Norm gilt außerdem für den kathodischen Korrosionsschutz von Anlagen, die aus nichtrostenden Stählen, Nickellegierungen, Kupferlegierungen oder Titanlegierungen hergestellt sind.

Die in der vorliegenden Norm beschriebenen Anforderungen und Empfehlungen für die kathodischen Korrosionsschutzsysteme stellen die Kontrolle aller galvanischen Kopplungen sicher, die durch die Verwendung von verschiedenen metallischen Werkstoffen verursacht werden könnten, und minimieren die Gefahren aufgrund von Wasserstoffversprödung oder wasserstoffinduzierter Spannungsrissbildung (siehe EN 12473).

5.3 Umwelt

Diese Europäische Norm gilt nur für Anlagen, die Meerwasser oder Brackwasser enthalten. Das Meerwasser kann entweder unbehandelt oder behandelt sein (z. B. mit Chlorierungsanlagen), um das Fouling von Rohrleitungen zu verhindern oder die Biodiversität aufrechtzuerhalten, wenn Ballasttanks von Schiffen in verschiedenen Teilen der Welt befüllt und entleert werden [2]. Besondere Anforderungen können für Anlagen gelten, die verschmutztes Meerwasser oder andere Flüssigkeiten enthalten, z. B. Altöltanks.

Bei Oberflächen, die abwechselnd in Wasser getaucht und der Atmosphäre ausgesetzt sind, ist der kathodische Korrosionsschutz nur wirksam, wenn die Anlage in Wasser getaucht und die Tauchzeit ausreichend lang ist, um den Stahl zu polarisieren.

5.4 Sicherheit und Umweltschutz

5.4.1 Allgemeines

Diese Europäische Norm enthält keine Informationen zu routinemäßigen Sicherheits- und Umweltschutzmaßnahmen, die nicht speziell im Zusammenhang mit dem kathodischen Korrosionsschutz stehen. Die entsprechenden nationalen oder internationalen Vorschriften müssen angewendet werden.

Sicherheitstechnische Anforderungen, die speziell für die Anwendung des kathodischen Korrosionsschutzes innerhalb des Anwendungsbereichs der vorliegenden Europäischen Norm gelten, sind enthalten.

Eine Umweltcheckliste ist in Anhang A enthalten.

Bei Fremdstromsystemen sollte eine automatisierte Steuerung des angelegten Potentials in Betracht gezogen werden und/oder es müssen Vorkehrungen getroffen werden, um Abfunkung zu verhindern, falls die Anode unter Spannung gesetzt wird, während sie sich oberhalb des Füllstands befindet. Anzuwendende Verfahren können die Positionierung der Anode umfassen, durch die sichergestellt wird, dass sie sich jederzeit unter Wasser befindet, und/oder die Anwendung eines Schnellabschaltungsverfahrens, bei dem die Gleichstromversorgung vollständig abgeschaltet wird, falls sich die Anode vorübergehend nicht unter Wasser befindet.

Der Einsatz von Fremdstromsystemen und einigen galvanischen Anoden kann für einige Anwendungen untersagt sein, beispielsweise wenn sich in der Nähe Tanks befinden, die Kohlenwasserstoffe enthalten [41] (siehe 8.6.).

5.4.2 Entstehung gefährlicher Gase

Durch den kathodischen Korrosionsschutz können die Gase Wasserstoff, Sauerstoff und Chlor entstehen. Einige Sauerstoff-Wasserstoff-Gemische sind explosiv; Chlor kann giftig und korrosiv sein.

Bei Auslegung und Betrieb der kathodischen Korrosionsschutzsysteme müssen diese Gefahren berücksichtigt werden, damit sichergestellt ist, dass keine schädlichen und gefährlichen Gasansammlungen entstehen können. Dies kann die Potentialsteuerung und/oder den Einsatz von Belüftungsanlagen umfassen.

Bei galvanischen Anoden sollte der Legierungswerkstoff so ausgewählt werden, dass die Gefahr minimiert wird.

5.4.3 Freisetzung von gasförmigem Wasserstoff

Bei Fremdstromsystemen und galvanischen Anoden (insbesondere Magnesiumanoden) verursacht die Polarisation die Entstehung von Wasserstoffgas an der geschützten Anlage. Aus diesem Grund kann bei geschlossenen Tanks oder in ähnlichen Situationen, bei denen sich Wasserstoff ansammeln kann, Explosionsgefahr bestehen. Zur Vermeidung dieser Gefährdung müssen alle Auslegungen eine Belüftung aufweisen, damit die Ansammlung eines signifikanten Volumens an Wasserstoff verhindert wird. Die Gasmengen sollten überwacht werden.

Die Entstehungsrate für Wasserstoff ist abhängig vom Anlage-Elektrolyt-Potential. Dort, wo die Entstehung von Wasserstoff eine Explosionsgefahr verursachen kann, muss das Anlage-Elektrolyt-Potential kontrolliert und überwacht werden.

5.4.4 Entstehung von gasförmigem Chlor

Bei kathodischen Korrosionsschutzsystemen mit Fremdstromsystemen, die in Meerwasser und Brackwasser betrieben werden, verursacht eine der anodischen Reaktionen die Entstehung von Chlor. Dies kann körperliche Beschwerden oder nachgelagerte Korrosionserscheinungen auslösen.

ANMERKUNG Angaben zu toxischen Mengen können dem Risikobewertungsbericht der Europäischen Union oder dem Bericht des US-amerikanischen Gesundheitsministeriums [3] entnommen werden.

Zur Reduzierung der Chlorbildung sollte die anodische Stromdichte durch einen reduzierten kathodischen Schutzstrombedarf und durch eine vergrößerte Anodenoberfläche minimiert werden.

5.4.5 Entleeren und Öffnen

Vor dem Öffnen einer geschlossenen Anlage müssen das kathodische Korrosionsschutzsystem mit Fremdstromsystem abgeschaltet und die eingeschlossenen Gasmengen für ungefährlich erklärt werden.

6 Kriterien für den kathodischen Korrosionsschutz

6.1 Allgemeines

Die Kriterien für den allgemein verwendeten kathodischen Korrosionsschutz sind in der Europäischen Norm EN 12473 „Allgemeine Grundsätze des kathodischen Korrosionsschutzes in Meerwasser“ enthalten. Die Kriterien beruhen auf dem Potential an der Oberfläche des zu schützenden Metalls; die verwendeten Messverfahren sollten sicherstellen, dass eine präzise Messung erfolgt (siehe 10.2).

Wenn verschiedene Metalle und Legierungen eine elektrische Längsleitfähigkeit verursachen, muss das erreichte Schutzpotential das negativste sein, damit die galvanische Korrosion des am wenigsten edlen Werkstoffs vermieden wird.

Ein negativer Grenzwert für das Potential kann in Abhängigkeit vom Metallwerkstoff erforderlich sein, um eine Ablösung der Beschichtung (siehe ISO 15711) und/oder nachteilige Auswirkungen aufgrund der Entstehung von Wasserstoff oder eines hohen pH-Werts zu vermeiden.

Die Kriterien für das Potential und die Grenzwerte werden ohne IR-Fehler ausgedrückt. IR-Fehler aufgrund von kathodischen Schutzströmen, die durch Elektrolytlösungen mit hohem Widerstand und Oberflächenfilme auf der geschützten Oberfläche fließen, sind in maritimen Anwendungen im Allgemeinen vernachlässigbar. Jedoch können in Anwendungen, die in dieser Europäischen Norm beschrieben werden, Potentialmessungen unter Verwendung von Sofort-Stopp-Verfahren oder Verfahren für einen Sofort-Stopp von Kupons erforderlich sein, um das Erreichen der Schutzkriterien angemessen nachzuweisen (siehe EN 13509). Besondere Aufmerksamkeit sollte diesem Punkt bei Anwendungen in Brackwasser und Schlamm oder in der Nähe von Fremdstromanoden gewidmet werden.

Die Kriterien gelten auch für Stahl in Brackwasser, jedoch müssen aufgrund von unterschiedlichem Salzgehalt mögliche Fehler berücksichtigt werden, wenn eine Ag/AgCl/Meerwasser-Bezugselektrode verwendet wird (siehe EN 12473).

6.2 Kohlenstoff-Mangan-Stähle

Um den Schutz von Kohlenstoff-Mangan-Stählen in belüftetem Meerwasser sicherzustellen, muss ein Schutzpotential mit einem negativeren Wert als $-0,80$ V bzgl. Ag/AgCl/Meerwasser erreicht werden. Dies entspricht etwa $+0,23$ V bei Messung in Bezug auf eine Reinzinkelektrode (z. B. Legierungstyp Z2 nach EN 12496) oder $+0,25$ V bei Messung in Bezug auf eine Zinkelektrode hergestellt aus Legierung Z1, Z3 oder Z4 für galvanische Anoden nach EN 12496.

Bei Wassertemperaturen oder Oberflächentemperaturen des Stahls von mehr als 60 °C muss das Kriterium $-0,90$ V bzgl. Ag/AgCl/Meerwasser sein. Bei Temperaturen zwischen 40 °C und 60 °C muss das Schutzpotential zwischen $-0,80$ V und $-0,90$ V bzgl. Ag/AgCl/Meerwasser interpoliert werden.

Bei Tanks und Anlagen, die Meerwasser oder Brackwasser enthalten, das nicht häufig (d. h. seltener als einmal im Monat) ausgetauscht wird, muss, unabhängig von der Temperatur, das Kriterium für anaerobe Bedingungen, d. h. $-0,90$ V bzgl. Ag/AgCl/Meerwasser gelten.

6.3 Nichtrostende Stähle und Nickellegierungen

In chlorhaltigen, belüfteten Umgebungen wie z. B. unbehandeltem Meerwasser und Brackwasser halten nichtrostende Stähle bekanntermaßen gleichmäßiger Flächenkorrosion stand, sodass die Möglichkeit von Spaltkorrosion und Lochkorrosion in den Fokus rückt. Um den Schutz der Legierung in diesen Umgebungen sicherzustellen, gelten die Schutzpotentiale nach EN 12473, d. h. $-0,30$ V bzgl. Ag/AgCl/Meerwasser für nichtrostende Stähle mit $PREN \geq 40$ und $-0,50$ V bzgl. Ag/AgCl/Meerwasser für nichtrostende Stähle mit $PREN < 40$.

Es können jedoch auch weniger konservative Kriterien angewendet werden, vorausgesetzt, diese sind begründet und dokumentiert. In diesem Fall müssen die ausgewählten Schutzpotentiale negativer sein als das kritische Spaltpotential, das für die Kombination einer bestimmten Legierung (PREN, Mikrostruktur usw.), für Spaltparameter (Geometrie, Oberflächenbeschichtung, Dichtungstypen, Dichtungsdruck von Flanschen usw.) und für Betriebsumgebungsbedingungen (Zusammensetzung, Temperatur, Geschwindigkeit usw.) bestimmt wurde.

Die Bestimmung des kritischen Spaltpotentials muss auf der Grundlage von nachgewiesenen Rückmeldungen aus dem Betrieb und/oder Laborprüfungen erfolgen, die für die vorgesehene Nutzungsdauer relevant sind. Wenn für eine bestimmte Praxissituation kein geeigneteres Verfahren existiert, sollte das Verfahren nach ISO 18070 für die Spaltformen bei flachen oder röhrenförmigen Messproben angewendet werden.

Im Fall von galvanischen Kopplungen zwischen Teilen aus nichtrostendem Stahl oder Nickellegierungen und Teilen aus Kohlenstoff-Mangan-Stahl muss das Schutzpotentialkriterium des Kohlenstoff-Mangan-Stahls negativer sein als $-0,80$ V bzgl. Ag/AgCl/Meerwasser.

Bei chlorhaltigem Meerwasser sind die empfohlenen Schutzpotentialkriterien für nichtrostende Stähle und Nickellegierungen die gleichen wie bei unbehandeltem Meerwasser, die Schutzstromdichten sind jedoch geringer (siehe 7.2.7).

6.4 Gefahr der Rissbildung durch Überschutz

Wenn für hochfeste Stähle oder andere Metalle, die durch den kathodischen Korrosionsschutz mit stark negativen Werten beeinträchtigt werden könnten, die Gefahr von Wasserstoffversprödung oder WSR besteht, muss ein weniger negativer Potentialgrenzwert definiert und angewendet werden. Falls für einen bestimmten Werkstoff keine ausreichenden Informationen vorliegen, muss dieser spezifische Potentialgrenzwert in Abhängigkeit von den metallurgischen und mechanischen Bedingungen durch Prüfung bestimmt werden. Weitere Informationen siehe EN 12473.

Für Kohlenstoff-Mangan-Stähle wird ein negativer Potentialgrenzwert von $-1,10\text{ V}$ bzgl. Ag/AgCl/Meerwasser empfohlen, um den Beginn/die Ausbreitung einer Rissbildung zu vermeiden. Weitere negative Potentialgrenzwerte müssen angewendet werden, um die kathodische Enthaftung von Beschichtungen und WSR von gefährdeten Stahlzusammensetzungen zu vermeiden (siehe EN 12473).

Bei nichtrostenden Stählen und Nickellegierungen können ferritische und martensitische Mikrostrukturen einer Wasserstoffversprödung unterliegen, wenn die Potentiale zu negativ sind. Potentiale, die negativer sind als die Grenzwerte, sollten vermieden werden. EN 12473 enthält Informationen dazu und Empfehlungen für die Qualifizierung der Werkstoffe.

Für Titan und Titanlegierungen besteht in Anwendungen mit kathodischem Korrosionsschutz die Gefahr der Titanhydridbildung. Titanhydrid kann Risse verursachen, wenn kritische Spannungen auftreten.

Die Einlassrohre von Wärmetauschern sind aufgrund ihres Aufbaus einer hohen mechanischen Spannung ausgesetzt. Rohre aus Grad-2-Titan sollten nicht einem negativeren Potential als $-0,75\text{ V}$ bzgl. Ag/AgCl/Meerwasser [5] ausgesetzt sein, wobei in der Literatur einige noch konservativere Werte zu finden sind, z. B. $-0,70\text{ V}$ [6] und sogar $-0,65\text{ V}$ [8].

Dieser konservative Ansatz kann durch andere Kriterien ersetzt werden, vorausgesetzt, dass diese durch eine Bewertung begründet und dokumentiert sind, damit sichergestellt ist, dass das Risiko annehmbar ist. Die Bewertung muss alle Lastbeiträge berücksichtigen, die Spannungen und Dehnungen verursachen. In jedem Fall darf das Potential des Titans nicht negativer sein als $-1,00\text{ V}$ bzgl. Ag/AgCl/Meerwasser, wie in EN 12499 festgelegt und in der Literatur dokumentiert [5].

Für andere Anwendungen mit geringeren Spannungen und Dehnungen, z. B. Röhrchenplatten, ist ein negativer Grenzwert von $-1,05\text{ V}$ bzgl. Ag/AgCl/Meerwasser ausreichend konservativ [10].

7 Auslegung

7.1 Ziele

Das Ziel eines kathodischen Korrosionsschutzsystems ist es, alle Teile der Innenflächen metallischer Tanks und Anlagen, einschließlich verbundener Anlagenteile, ausreichend mit Strom zu versorgen, damit die Schutzkriterien nach Abschnitt 6 erreicht werden. Der Strom sollte dabei so verteilt werden, dass das Anlage-Elektrolyt-Potential jedes Teils unter normalen Betriebsbedingungen innerhalb der durch die Schutzkriterien gegebenen Grenzwerte liegt (siehe Abschnitt 6). Es sollten Dauerbezugselektroden installiert werden, um Potentialmessungen an ausgewählten Stellen zu ermöglichen.

Möglicherweise kann es für einige Bereiche oder Teile von Anlagen schwierig sein, gleiche Niveaus kathodischen Korrosionsschutzes zu erreichen. In diesem Fall wird die Verwendung von in abgeschirmten Bereichen installierten Bezugselektroden empfohlen, insbesondere zur Unterstützung der Inbetriebnahme. Ein kathodisches Korrosionsschutzsystem für Tanks und Anlagen wird i. d. R. kombiniert mit einer Schutzbeschichtung, auch wenn einige Anlagenteile wie z. B. Pumpen und kleine Rohre möglicherweise nicht beschichtet sein können. Eine wirksame Beschichtung wird insbesondere empfohlen, wenn Temperatur und/oder Fließgeschwindigkeit des Wassers hoch sind, wie z. B. in Rohrleitungssystemen oder Kühlwasserbehältern von Wärmetauschern.

Wenn keine Anweisungen zur Auslegungslbensdauer vorliegen, muss das kathodische Korrosionsschutzsystem entweder für die Nutzungsdauer der Anlage ausgelegt werden oder für einen Zeitraum, der einer geplanten Instandhaltung entspricht, wie z.B. dem Trockendockintervall bei Ballasttanks von Schiffen oder schwimmenden Offshore-Bauwerken. Wenn eine Auslegung des kathodischen Korrosionsschutzsystems für die Nutzungsdauer der Anlage nicht machbar oder eine geplante Instandhaltung nicht möglich ist, sollte das System so ausgelegt sein, dass die Bauteile des kathodischen Korrosionsschutzes leicht ausgetauscht werden können. Wartungsöffnungen für den Austausch von Anoden und Bezugselektroden, z. B. bei Rohrleitungssystemen, können in Betracht gezogen werden.

Bei voraussichtlich geringen Strombedarfen über die Gesamtnutzungsdauer der Anlage kann der kathodische Korrosionsschutz mit galvanischen Anoden umgesetzt werden. Fremdstromsysteme werden i. d. R. in anderen Situationen eingesetzt, z. B. bei höherem Strombedarf, zeitweisem Korrosionsschutz von großen, Meerwasser oder Brackwasser enthaltenden Anlagenteilen während hydrostatischer Druckprüfungen, für Rohrleitungssysteme oder Kühlwasserbehälter von großen Wärmetauschern.

Jede Phase der Auslegung, Montage, Aktivierung, Inbetriebnahme und des Langzeitbetriebs sowie die Aufzeichnungen aller Elemente von kathodischen Korrosionsschutzsystemen müssen dokumentiert werden.

Jede Teilaufgabe sollte in Übereinstimmung mit einem Qualitätsplan durchgeführt werden.

ANMERKUNG EN ISO 9001 kann als eine geeignete Norm zu Qualitätsmanagementsystemen herangezogen werden.

Alle Prüfgeräte müssen über gültige Kalibrierscheine verfügen, die auf nationalen oder Europäischen Normen zur Kalibrierung beruhen.

Die Dokumentation muss Teil der dauerhaften Aufzeichnungen sein.

7.2 Auslegungsparameter

7.2.1 Allgemeines

Bei der Auslegung eines kathodischen Korrosionsschutzsystems müssen folgende Schritte durchlaufen werden:

- a) Bestimmung der beschichteten und unbeschichteten Bereiche, die dem Wasser ausgesetzt sind;
- b) Bestimmung der maximalen und mittleren Strombedarfe für jeden der ermittelten Bereiche unter Berücksichtigung von Temperatur und Fließgeschwindigkeit des Wassers;
- c) Bestimmung der Art des kathodischen Korrosionsschutzsystems (galvanisch, mit Fremdstrom oder hybrid);
- d) Bestimmung von Größe, Form und Anzahl der Anoden, die erforderlich sind, um eine Haltbarkeit über die Auslegungslbensdauer sicherzustellen;
- e) Bestimmung der Positionen für die Anoden und deren Montage;
- f) Bestimmung der Arten von Bezugselektroden, deren Positionen und deren Montage.

Für die Auslegung eines kathodischen Korrosionsschutzsystems muss nachgewiesen werden, dass jede Teilanlage und jeder Anodenbereich mit dem kathodischen Schutzstrom versorgt wird, der erforderlich ist, um einen kathodischen Korrosionsschutz zu bewirken und die Kriterien nach Abschnitt 6 unter allen Betriebsbedingungen zu erfüllen.

Bei der Anordnung der Anoden müssen die Positionen von Grenzflächen zwischen unterschiedlichen Metallwerkstoffen berücksichtigt werden.

Es müssen zwei Werte betrachtet werden:

- $I_{\max}$: maximaler Strombedarf, der den härtesten Betriebsbedingungen zugeordnet wird (z. B. Beschichtungsreduktionsfaktor am Ende der Nutzungsdauer und maximale Oberflächen, maximale Wassertemperatur und Fließgeschwindigkeit) und für die Auslegung der maximalen Strombelastbarkeit des kathodischen Korrosionsschutzsystems herangezogen wird;
- I_{mean} : mittlerer Strombedarf, der für die Berechnung der Mindestmasse an galvanischem Anodenwerkstoff oder der für die Aufrechterhaltung des kathodischen Korrosionsschutzes über die Auslegungslbensdauer erforderlichen Nutzungsdauer der Fremdstromanoden verwendet wird.

Um die Auslegung zu optimieren, sollte Folgendes festgelegt werden:

- Maximal- und Mindestwiderstand, -temperatur und -fließgeschwindigkeit des Wassers;
- Auslegungslbensdauer des kathodischen Korrosionsschutzsystems;
- Anfangsstromdichte, die erforderlich ist, um die anfängliche Polarisation der Anlage j_i zu erreichen;
- Erhaltungsstromdichte, die erforderlich ist, um die Polarisation der Anlage j_m aufrechtzuerhalten;
- mittlerer Beschichtungsreduktionsfaktor f_{cm} ;
- finaler Beschichtungsreduktionsfaktor f_{cf} .

ANMERKUNG Da die Dauer der anfänglichen Polarisation vor dem stabilen Zustand i. d. R. kurz ist im Vergleich zur Auslegungslbensdauer, liegen die Werte der mittleren Stromdichte über die Nutzungsdauer der Anlage und der Erhaltungsstromdichte meist sehr nah beieinander.

Richtwerte für Erhaltungs- und Anfangsschutzstromdichten sowie mittlere und finale Beschichtungsreduktionsfaktoren herkömmlicher Beschichtungen finden sich in Anhang B.

Die Einheiten müssen in den nachfolgenden Berechnungen konsistent weiterverwendet werden und dem gegenwärtigen Stand der Technik entsprechen.

7.2.2 Unterteilung der zu schützenden Oberflächen

Die zu schützenden Anlagenteile sollten in verschiedene kathodische Korrosionsschutzbereiche unterteilt werden, damit eine gute Stromverteilung sichergestellt ist; diese Bereiche können hinsichtlich der Auslegung des kathodischen Korrosionsschutzes separat betrachtet werden, obwohl sie nicht notwendigerweise elektrisch voneinander getrennt sein können.

ANMERKUNG Komplexe Geometrien, wie sie z. B. aufgrund von Versteifungen auf Böden von Ballasttanks zu finden sind, stellen ein typisches Beispiel dar.

Jeder kathodische Korrosionsschutzbereich kann aus mehreren Bauteilen bestehen, deren Parameter bestimmt werden sollten, darunter Werkstoff (Stahl, Gusseisen usw.), Oberfläche und ggf. Beschichtungsmerkmale (Art, Nutzungsdauer und Beschichtungsreduktionsfaktor).

7.2.3 Bei Berechnungen zu berücksichtigende effektive Oberflächen

Im Allgemeinen müssen alle mit Wasser benetzten Oberflächen in die Auslegung des kathodischen Korrosionsschutzsystems einbezogen werden. Die Oberflächen sollten vorzugsweise auf der Grundlage von CAD-Zeichnungen bestimmt werden.

Die maximale Oberfläche $S_{\max}$ wird als Grundlage für die Berechnung des maximalen Strombedarfs verwendet und umfasst flache Oberflächen sowie Stützstrukturen wie T-Träger, Lamellen, Rohrleitungen usw. In jedem Fall umfasst sie die Fläche an der Oberseite des Tanks oder der Anlage.

Bei Tanks mit unterschiedlichen Ebenen (z. B. Ballasttanks) müssen zwei weitere Faktoren berücksichtigt werden. Erstens der Freiraumfaktor u_f als maximaler benetzter Anteil der Tankoberfläche und zweitens der Benetzungsfaktor k als Anteil der Auslegungslbensdauer, während der die Oberflächen benetzt sein werden. Mit diesen zwei Faktoren lässt sich die mittlere Oberfläche S_{mean} berechnen und der mittlere Strombedarf für Tanks mit unterschiedlichen Ebenen bestimmen. Die mittlere Oberfläche ist die maximale Oberfläche $S_{\max}$ multipliziert mit einem Freiraumfaktor u_f und einem Benetzungsfaktor k .

$$S_{\text{mean}} = S_{\max} \cdot u_f \cdot k \quad (1)$$

Bei Wasserbehältern von Wärmetauschern fließt, bezogen auf deren beschichtete Stahloberfläche, der Hauptteil des Schutzstroms durch die Rohrböden, die i. d. R. aus unbeschichteter Kupferlegierung, Titan oder nichtrostendem Stahl bestehenden. Der Stromfluss durch die Rohre des Wärmetauschers muss ebenfalls berücksichtigt werden.

7.2.4 Berechnung des Strombedarfs beschichteter Oberflächen

7.2.4.1 Maximaler Strombedarf

Der maximale Strombedarf $I_{\max c}$ wird wie folgt berechnet:

$$I_{\max c} = S_{\max c} \cdot f_{cf} \cdot j_m \quad (2)$$

Dabei ist

$S_{\max c}$ die maximale benetzte, beschichtete Oberfläche;

f_{cf} der finale Beschichtungsreduktionsfaktor;

j_m die Erhaltungsschutzstromdichte von unbeschichtetem Stahl unter den hinsichtlich Temperatur und Fließgeschwindigkeit härtesten Bedingungen.

7.2.4.2 Mittlerer Strombedarf

Der mittlere Strombedarf $I_{\text{mean } c}$ wird wie folgt berechnet:

$$I_{\text{mean } c} = S_{\text{mean } c} \cdot f_{cm} \cdot j_m \quad (3)$$

Dabei ist

$S_{\text{mean } c}$ die mittlere benetzte, beschichtete Oberfläche;

f_{cm} der mittlere Beschichtungsreduktionsfaktor;

j_m die Erhaltungsschutzstromdichte von unbeschichtetem Stahl.

7.2.5 Berechnung des Strombedarfs unbeschichteter Oberflächen

7.2.5.1 Maximaler Strombedarf

Der maximale Strombedarf $I_{\max b}$ wird wie folgt berechnet:

$$I_{\max b} = S_{\max b} \cdot j_i \quad (4)$$

Dabei ist

$S_{\max b}$ die maximale unbeschichtete Oberfläche;

j_i die Anfangsschutzstromdichte von unbeschichtetem Stahl unter den hinsichtlich Temperatur und Fließgeschwindigkeit härtesten Bedingungen.

7.2.5.2 Mittlerer Strombedarf

Der mittlere Strombedarf $I_{\text{mean } b}$ wird wie folgt berechnet:

$$I_{\text{mean } b} = S_{\text{mean } b} \cdot j_m \quad (5)$$

Dabei ist

$S_{\text{mean } b}$ die mittlere benetzte, unbeschichtete Oberfläche;

j_m die Erhaltungsschutzstromdichte von unbeschichtetem Stahl.

ANMERKUNG Bei geschlossenen Behältern entspricht der finale Strombedarf für die Repolarisation häufig dem Erhaltungsstrombedarf.

7.2.6 Schutzstromdichte für unbeschichtete Kohlenstoff-Mangan-Stähle

Die für unbeschichtete Kohlenstoff-Mangan-Stähle erforderliche Schutzstromdichte ist abhängig von Betriebstemperatur, Fließrate (Fließgeschwindigkeit des Wassers) und dem Gehalt an gelöstem Sauerstoff; diese Faktoren können sich auf komplexe Weise gegenseitig beeinflussen (siehe die Kommentare zur Auswirkung von Umweltfaktoren auf den Strombedarf in EN 12473).

Bei hohen Fließgeschwindigkeiten des Wassers findet der Sauerstofftransport zur Oberfläche mit erhöhter Geschwindigkeit statt, was einen erhöhten Schutzstrombedarf zur Folge hat.

Wenn der Gehalt an gelöstem Sauerstoff geringer als üblich ist (z. B. aufgrund einer Umwandlung des Sauerstoffs durch die kathodische Reaktion in Systemen mit geringem Wasserdurchsatz wie z. B. innerhalb von gefluteten Bauteilen), darf die Stromdichte reduziert werden.

Bei niedrigen Temperaturen (typischerweise weniger als 5 °C) und/oder hohen Fließgeschwindigkeiten (typischerweise größer als 10 m·s⁻¹) tritt die Entstehung von Kalkschichten nur begrenzt auf, weshalb hohe Erhaltungsstromdichten erforderlich sind.

Leitlinien für erforderliche Schutzstromdichten finden sich in Anhang B.1.

Wenn keine spezifischen Daten vorliegen, darf der kathodische Schutzstrombedarf für andere Metalle und Legierungen wie z. B. Kupferlegierungen oder nichtrostende Stähle basierend auf der gleichen Hypothese wie für Kohlenstoff-Mangan-Stähle ermittelt werden.

7.2.7 Schutzstromdichte für nichtrostende Stähle und Nickellegierungen

In unbehandeltem Meerwasser (kein Einsatz von Chlorierung oder sonstiger relevanter chemischer Behandlung) sind für nichtrostende Stähle und Nickellegierungen zur Erfüllung ihrer Schutzpotentialkriterien ($-0,30\text{ V}$ bis $-0,50\text{ V}$ bzgl. Ag/AgCl/Meerwasser) annähernd die gleichen Stromdichten erforderlich wie für Kohlenstoff-Mangan-Stähle. Wenn die Wassertemperatur 40 °C übersteigt, ist aufgrund des weniger wirksamen Biofilms eine niedrigere Schutzstromdichte erforderlich [11]. Bei einer Polarisation bis $-0,85\text{ V}$ bzgl. Ag/AgCl/Meerwasser ist aufgrund der Entstehung von kalkhaltigen Ablagerungen eine niedrigere Stromdichte erforderlich.

Da eine Chlorierung die Entstehung von Biofilmen begrenzt, können in Meerwasser mit Chlorierungswerten von $0,2\text{ ppm}$ bis 1 ppm niedrigere Schutzstromdichten verwendet werden, falls diese begründet und dokumentiert sind. Die Schutzstromdichte steigt mit der Zunahme von Chlorrückständen. Beispiele sind in der Literatur [12] aufgeführt. Die erforderliche Schutzstromdichte steigt mit Zunahme der Temperatur [11].

7.3 Anwendungen für bestimmte Anlagenteile

7.3.1 Rohrleitungssysteme

Kathodische Korrosionsschutzsysteme für Rohrleitungen bestehen aus innerhalb der Rohrleitungen verteilten, i. d. R. in gleichmäßigen Abständen angeordneten Anoden. Die Anzahl der Anoden und die Abstände zwischen ihnen sind abhängig vom Rohrdurchmesser, von der Beschichtung, falls vorhanden, der Fließgeschwindigkeit des Meerwassers (oder Brackwassers), der Chlorierung, falls zutreffend, der Temperatur, dem spezifischen Widerstand und dem Anodenredundanzfaktor. Die Abstände zwischen den Anoden müssen so bemessen sein, dass ein kathodischer Korrosionsschutz erreicht und aufrechterhalten werden kann.

Aufgrund der länglichen Form des Inneren der zu schützenden Anlage ist die Reichweite des Schutzes oder Überschutzes eines Anodensystems abhängig von der Abschwächung des Stroms aufgrund des ohmschen Spannungsabfalls im Wasser, wobei der Widerstand des Metalls vernachlässigbar ist.

Die Potentialverteilung innerhalb des Rohrleitungssystems muss so bestimmt werden, dass die Wirksamkeit des ausgelegten kathodischen Korrosionsschutzes innerhalb von Rohren nachgewiesen werden kann. Folgende Maßnahmen mit absteigender Priorität können dazu eingesetzt werden:

- Erfahrungen und Rückmeldungen aus ähnlichen Situationen;
- Messungen der Potentialverteilung in Einrichtungen, die den relevanten Parametern der zu schützenden Anlagenteile entsprechen;
- mathematische Modellierung zur Bewertung der Abschwächung des Stroms in Rohren. Die Modellierung ist insbesondere bei komplexen Geometrien hilfreich;
- vereinfachte Verfahren, die in Anhang C beschrieben sind.

ANMERKUNG Bei einigen Anwendungen ist nur eine Anode zur lokalen Kontrolle galvanischer Kopplungen an bestimmten Stellen erforderlich. In diesen Fällen werden durch die vereinfachten Verfahren aufgrund des Einflussfaktors der benachbarten Anoden die Schutzlängen innerhalb von Rohrleitungen überschätzt.

Die Gefahr mechanischer Beschädigungen an innerhalb von Rohrleitungen befindlichen Anoden steigt mit zunehmender Geschwindigkeit und/oder Turbulenz des Wasserstroms deutlich an. Die Abstände zwischen den Anoden, ihre Auslegung und ihre Position müssen so gewählt werden, dass die Robustheit und Redundanz des Systems unter Berücksichtigung des auf die Rohrleitungen angewendeten Instandhaltungsprogramms sichergestellt sind.

Ein Anodenredundanzfaktor kann verwendet werden, um die umwelt- und sicherheitsbezogenen Auswirkungen von Leckagen, das Instandhaltungsprogramm, die Intervalle zwischen möglichen Interventionen zum Anodenaustausch sowie die Einfachheit und Art dieses Austauschverfahren zu berücksichtigen. Der Anodenredundanzfaktor ist ein Multiplikator, der auf die theoretische Anzahl von Anoden angewendet wird, die erforderlich ist, um bei Beschädigungen oder Ausfällen von Anoden den Korrosionsschutz weiter aufrechtzuerhalten.

BEISPIEL 1 Ein Anodenredundanzfaktor von 1 wird typischerweise für ein leicht zugängliches Rohr mit häufigen Instandhaltungsinterventionen gewählt, bei dem das Risiko eines lokalen, zeitweisen Schutzverlusts als annehmbar betrachtet wird.

BEISPIEL 2 Falls ein Anodenredundanzfaktor von 2 für ein Rohr gewählt wird, bei dem der Anodenaustausch schwierig und/oder das Instandhaltungsprogramm aufwändig ist, betragen die tatsächlichen Abstände nur die Hälfte der berechneten Abstände zwischen den Anoden.

7.3.2 Rohrbündelkondensatoren und Wärmetauscher

Wegen der hohen Fließgeschwindigkeit des Wassers, der unterschiedlichen Metalle und/oder der hohen Temperatur ist der kathodische Korrosionsschutz entscheidend, um eine Korrosion der Werkstoffe und die Gefahr der galvanischen Korrosion innerhalb von Kondensatoren und Wärmetauschern zu vermeiden, bei denen Meerwasser als Kühlflüssigkeit verwendet wird. Insbesondere können die Wasserbehälter von Rohrbündelkondensatoren und Wärmetauschern mit Einlässen und Auslässen aus Stahl und Rohrböden und Rohren aus Kupferlegierungen, nichtrostenden Stählen oder Titan hergestellt sein. Da die Wasserbehälter i. d. R. beschichtet (oder ausgekleidet) sind, muss besonderes Augenmerk auf die Vermeidung einer beschleunigten Korrosion der Stahloberflächen infolge von galvanischer Kopplung an Fehlstellen der Beschichtung gelegt werden.

Der kathodische Korrosionsschutz kann entweder mit galvanischen Anoden oder einem Fremdstromsystem umgesetzt werden. Das Rohrboden und die Rohre besitzen eine im Verhältnis zu den beschichteten Wasserbehältern große Fläche, und für große Anlagenteile aus Werkstoffen, die hohe Schutzstromdichten erfordern, können die allgemeinen Anforderungen an den Schutzstrom derart sein, dass es mit galvanischen Anoden nicht möglich ist, den Strombedarf zu decken und/oder die Anforderungen an die Nutzungsdauer zu erfüllen. Bei großen Kondensatoren werden daher häufig Fremdstromsysteme eingesetzt. Galvanische Anoden können verwendet werden, wenn die Anforderungen an den Schutzstrom und seine Verteilung erfüllt werden können und das Instandhaltungsprogramm dies zulässt.

Wenn Titan für das Rohrboden und/oder die Rohre verwendet wird, muss das Polarisationspotential der geschützten Wasserbehälter aus Stahl ohne Überschutz des Titans erreicht werden. So wird das Risiko einer Rissbildung aufgrund der Entstehung von Titanhydrid vermieden. Wenn Fremdstromsysteme eingesetzt werden, sollten diese eine Potentiostat-Steuerung ermöglichen (siehe 9.1), damit ein konstantes Schutzpotential aufrechterhalten und die Gefahr einer Rissbildung aufgrund der Entstehung von Titanhydrid als Folge von Überschutz vermieden wird (siehe 6.4).

7.3.3 Filter

Bei Filtern ist aufgrund der wechselnden Bedingungen (Fließgeschwindigkeit des Wassers und Sauerstoffaustausch) besondere Aufmerksamkeit erforderlich.

Der kathodische Korrosionsschutz kann zur Entstehung von inakzeptablen, kalkhaltigen Ablagerungen auf der geschützten Anlage führen, wodurch die Wasserströmung beeinflusst werden kann. Zur Vermeidung dieses Risikos kann der angelegte kathodische Schutzstrom reduziert werden. Dazu kann eine Beschichtung aufgebracht werden (um den Bedarf an kathodischem Korrosionsschutz zu reduzieren) und der angewendete kathodische Korrosionsschutz kann so angepasst werden, dass das positivste Potential erreicht wird, bei dem der kathodische Korrosionsschutz noch aufrechterhalten wird.

Die für den kathodischen Korrosionsschutz erforderlichen Stromdichten können in Abhängigkeit von den Betriebsbedingungen erheblich variieren. Die unterschiedlichen spezifischen Leitfähigkeiten in Multischicht-Filtermassen erfordern unterschiedliche Schutzstromdichten, und auch die Stromverteilung kann besondere Berücksichtigung erfordern.

Bei der Entwicklung von kathodischen Korrosionsschutzsystemen für Filter müssen die besonderen Anforderungen für diesen Anwendungsfall berücksichtigt werden, und die Auslegungsparameter müssen vollständig im Auslegungsbericht dokumentiert werden.

7.3.4 Zeitlich begrenzt eingesetzte Systeme für die hydrostatische Druckprüfung von Tanks unter Verwendung von Meerwasser

Öltanks und Kryo-Behälter für Flüssiggas dürfen zum Zweck von Zugfestigkeitsprüfungen und hydrostatischen Druckprüfungen auf Leckagen vor der Inbetriebnahme mit Meerwasser gefüllt werden [13], [14].

ANMERKUNG Die erforderliche Dauer, um Prüfungen auf mechanische Zugfestigkeit und Leckagen durch Befüllung des Tanks mit Wasser durchzuführen, ist lang (8 Wochen oder länger), und damit ausreichend, um Korrosion entstehen zu lassen. Durch das Meerwasser setzt sofort eine starke Korrosion ein, die sich insbesondere auf Bereiche des Tanks konzentriert, die aufgrund der Schweißnähte zwischen den Stahlblechen einer Wärmebeanspruchung ausgesetzt waren, und noch stärker auf den Bodenteil des Tanks, der durch die höhere Last während des Betriebs beansprucht wird.

Die metallischen Bodenteile und Seitenwände dieser Tanks, die typischerweise aus unbeschichtetem Kohlenstoffstahl oder nickellegiertem Stahl bestehen, können zeitweilig durch kathodischen Korrosionsschutz geschützt werden, indem mit beweglichen, in den Tank eingetauchten Anoden ein elektrischer Strom eingeleitet wird.

7.3.5 Gründungspfeiler von Offshore-Windkraftanlagen

Die innenliegenden Bereiche der Gründungspfeiler von Offshore-Windkraftanlagen erfordern eine besondere Aufmerksamkeit hinsichtlich der Auslegung des kathodischen Korrosionsschutzes und der Anodenauswahl.

Sowohl ICCP-Systeme als auch galvanische Systeme können eine Ansäuerung innerhalb der Gründungspfeiler auslösen, falls der Austausch von Meerwasser verhindert wird. Mit Aluminiumanoden wurden pH-Werte um 4–5 gemessen. Für neue Anlagen wird empfohlen, eine Rate für den Austausch von Meerwasser vorzusehen, bei der eine Ansäuerung des Wassers reduziert wird. Eine weitere Möglichkeit ist die Verwendung von Zink anstelle von Aluminium, da dann die Ansäuerung in geringerem Ausmaß erfolgt [15], [16], [17].

ANMERKUNG Informationen zu Gründungspfeilern von Offshore-Windkraftanlagen werden in CEN TS xxx „Internal and external cathodic protection of offshore submerged structures and associated equipment of wind turbines“ (in Vorbereitung) enthalten sein.

8 Systeme mit galvanischen Anoden

8.1 Typ, Größe, Form und Anzahl der Anoden

Typ, Größe, Form und Anzahl der Anoden werden so bestimmt, dass der Strombedarf während der vorgesehenen Nutzungsdauer der Anoden gedeckt wird.

Die folgenden Schritte sind zu berücksichtigen.

8.2 Auswahl des Anodenwerkstoffs

Es können Anoden auf Zink-, Aluminium- oder Magnesiumbasis verwendet werden. Sie müssen nach EN 12496 hergestellt sein.

Für den Schutz von nichtrostenden Stählen, Nickellegierungen oder Kupferlegierungen können Anoden aus Weicheisen verwendet werden, wenn das ausgewählte Schutzpotential es zulässt und die Entstehung von Eisenionen nicht nachteilig ist (oder, wie im Fall von Kupferlegierungen, vorteilhaft sein kann).

Es ist möglicherweise nicht angemessen, unterschiedliche galvanische Anodenwerkstoffe zum Schutz desselben Tanks oder derselben Anlage gemeinsam zu verwenden.

Die elektrochemischen Eigenschaften des Anodenwerkstoffs müssen dokumentiert sein oder durch angemessene Prüfungen bestimmt werden.

Folgende Informationen sind erforderlich:

- 1) Das Potential des geschlossenen Stromkreises des Anodenwerkstoffs;
- 2) das Treibpotential bis zum polarisierten Stahl, d. h., der Unterschied zwischen dem Potenzial des geschlossenen Stromkreises der Anode und dem positiven Grenzwert des Schutzpotentialkriteriums;
- 3) die praktische Strombelastbarkeit ($A \cdot h \cdot kg^{-1}$) oder die Anodenabnutzung ($kg \cdot A^{-1} \cdot y^{-1}$);
- 4) die Anfälligkeit für Passivierung;
- 5) die Anfälligkeit für interkristalline Korrosion;
- 6) Größe und Form der gegenwärtig erhältlichen Anoden.

Folgende Leitlinien können bei der Auswahl des galvanischen Anodenwerkstoffs herangezogen werden:

- Eine Niederspannungs-Aluminiumlegierung wie z. B. Legierung A4 nach EN 12496 kann verwendet werden, um die Wasserstoffversprödung geschützter Werkstoffe zu vermeiden oder nichtrostende Stähle oder Nickellegierungen zu schützen, wenn das gewählte Schutzpotential es zulässt.
- Die Verwendung von Anoden aus Weicheisen zum Schutz von nichtrostenden Stählen oder Nickellegierungen kann zu einer Kontamination des Meerwassers mit Eisenionen führen, die sich möglicherweise nachteilig auf das örtliche Korrosionsverhalten anderer nachgelagerter, ungeschützter Anlagenteile aus nichtrostendem Stahl auswirken können [18].
- Die Verwendung von Magnesium kann nachteilige Auswirkungen aufgrund von Überschutz haben.

In Installationssituationen, bei denen Explosionsgefahr bestehen kann aufgrund von Betriebsbedingungen, unter denen wahrscheinlich explosive Gasgemische auftreten (z. B. Ballasttanks in unmittelbarer Nähe von Öllagertanks auf Tankschiffen oder Produktions- und Lagereinheiten), muss die Auswahl des Anodenwerkstoffs nach den anwendbaren Sicherheitsvorschriften, wie in 8.6 beschrieben, erfolgen.

8.3 Reduzierung des Treibpotentials durch einen Widerstand oder eine Diode

Wenn ein Widerstand oder eine Diode zwischen eine galvanische Anode und den zu schützenden Werkstoff geschaltet wird, kommt es zu einem Spannungsabfall im Stromkreis. Durch diesen Spannungsabfall wird das Potential der Anlage positiver (d. h. weniger negativ bzgl. Ag/AgCl/Meerwasser).

Widerstände erzeugen einen Spannungsabfall, der in Übereinstimmung mit dem ohmschen Gesetz direkt proportional zum Stromfluss ist. Es können entweder Festwiderstände oder einstellbare Widerstände verwendet werden, je nachdem, ob der Anodenstrom während des Betriebs verändert werden muss.

Der Spannungsabfall über eine Diode ist abhängig vom Gerätetyp sowie der Gerätebetriebstemperatur. Die Zusammenhänge zwischen Spannungsabfall und Stromfluss sowie der Einfluss der Gerätetemperatur sind für eine typische Diode in Bild 1 dargestellt.

Mit einer Diode verbundene galvanische Anoden können verwendet werden, um das negative Potential des kathodischen Korrosionsschutzes bei Werkstoffen zu begrenzen, die für WSR anfällig sind.

Die Merkmale der Diode müssen den Betriebsanforderungen angepasst werden.

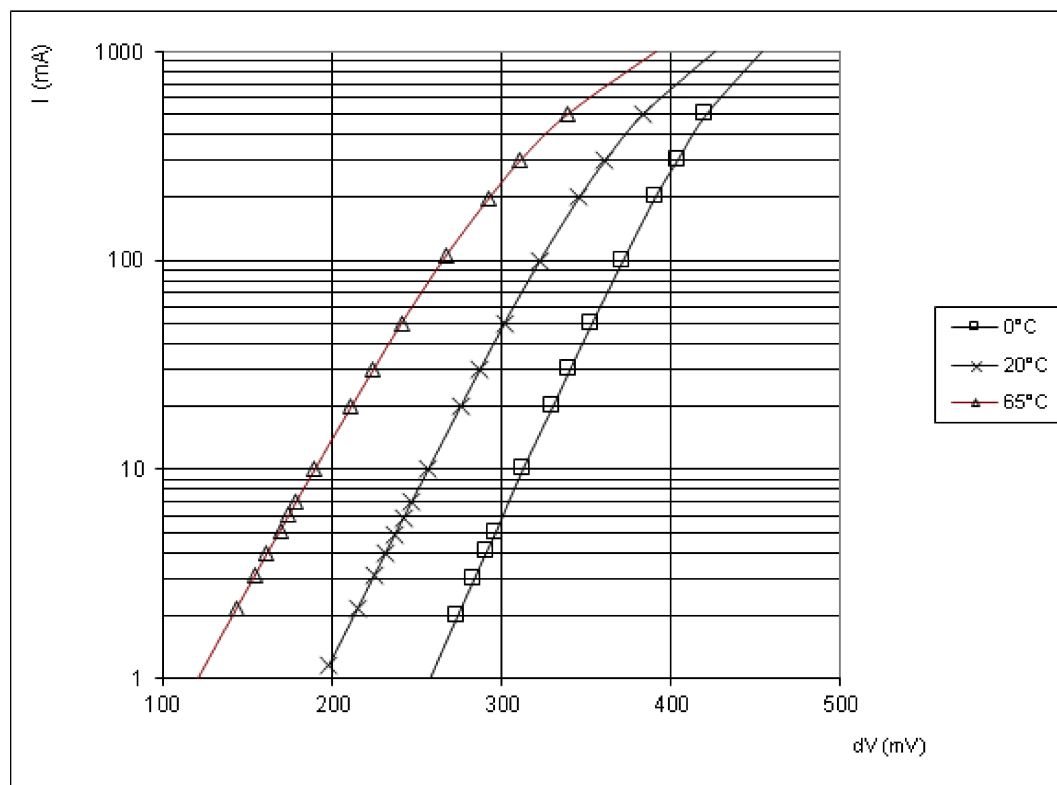


Bild 1 — Beispiel für Diodenmerkmale

Mit einem Widerstand verbundene galvanische Anoden können zum kathodischen Korrosionsschutz von nichtrostenden Stählen in chloriertem Meerwasser verwendet werden, oder für jeden Werkstoff, der in Meerwasser bei erhöhten Temperaturen durch eine niedrige Stromdichte geschützt ist. In Bild 2 ist ein mit einer Zinkanode geschütztes System aus nichtrostendem Stahl dargestellt.

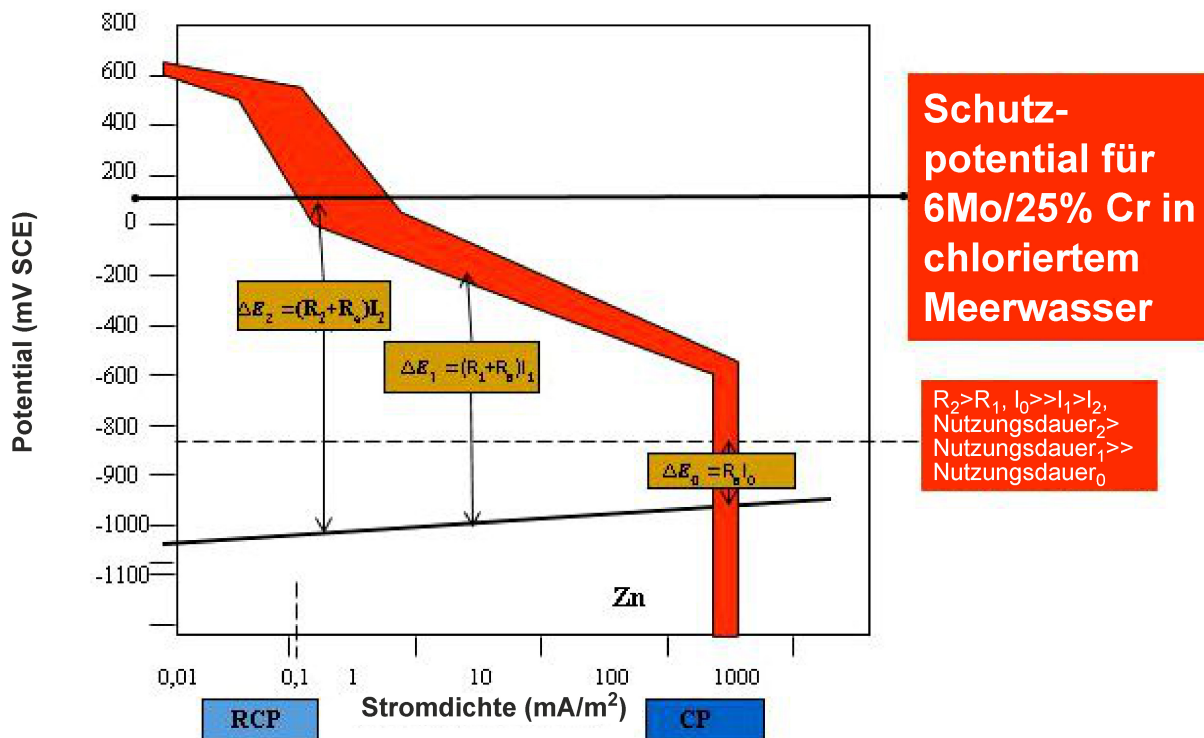


Bild 2 — Prinzip der Wirkungsweise eines widerstandsgeregelten Anodenstroms

ANMERKUNG Die Werte in Bild 2 dienen ausschließlich der besseren Darstellung.

8.4 Anzahl und Abmessungen der Anoden

Während der Auslegung muss die Anzahl der Anoden so festgelegt werden, dass zwei Kriterien erfüllt oder übertroffen werden:

- die Fähigkeit, den maximalen Strombedarf $I_{\max}$ unter Bedingungen des ungünstigsten Falles zu erzeugen. Die Mindestanzahl von Anoden wird aus dem Strombedarf dividiert durch die Stromabgabe pro Anode bestimmt;
- die Fähigkeit der Anoden, eine Haltbarkeit gleich der Auslegungslbensdauer aufzuweisen, basierend auf dem mittleren Strombedarf I_{mean} . Die Mindestanzahl von Anoden wird durch eine Berechnung auf der Grundlage der in Anhang D angegebenen Masse des Anodenwerkstoffs bestimmt.

Übereinstimmend mit der Strombelastbarkeit und der Auslegungslbensdauer sollten die Abmessungen von galvanischen Anoden so optimiert werden, dass das Gesamtgewicht der Anoden minimiert wird.

Die Stromabgabe darf direkt nach dem ohmschen Gesetz bestimmt werden, d. h. Anodenspannung zur geschützten Anlage dividiert durch den errechneten Anodenwiderstand zum Meerwasser-Elektrolyten.

Anhang D liefert Leitlinien für die Berechnung von Anzahl, Masse und Abmessungen von Anoden.

Zusätzliche Berechnungen können durch numerische Modellierung durchgeführt werden, z. B. auf der Grundlage der Finite-Elemente-Methode oder Randelementmethode.

8.5 Positionen der Anoden und Montage

8.5.1 Allgemeines

Die Anoden müssen so an der Anlage positioniert werden, dass Stromverteilung und Anodengewicht die Auslegungsanforderungen über die gesamte Oberfläche erfüllen.

Ein niedriger elektrischer Übergangswiderstand muss für die gesamte Nutzungsdauer der Anoden aufrechterhalten werden.

8.5.2 Tanks und Anlagen mit ebenen Oberflächen

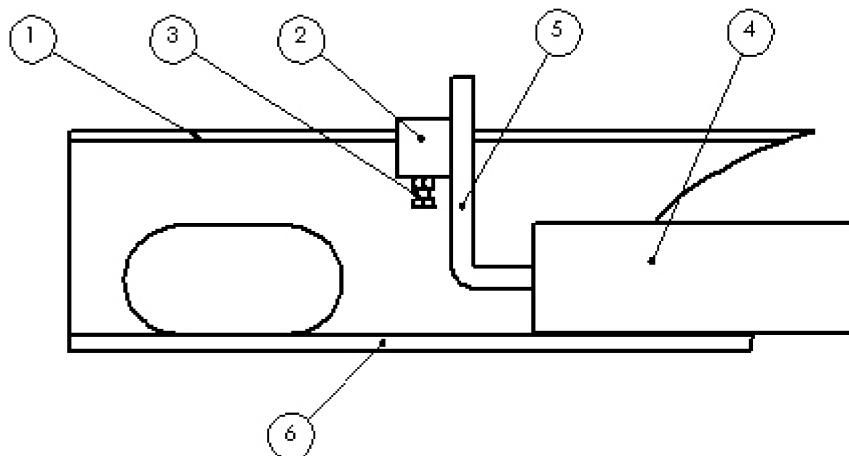
Bei der Montage in Tanks und Anlagen, die nicht vollständig entleert werden dürfen, müssen Anoden an der niedrigsten möglichen Stelle positioniert werden. Die Verteilung des Anodenstroms von der ausgewählten niedrigsten Stelle kann durch die Anlagengeometrie beeinflusst werden.

Besonderes Augenmerk muss aufgrund des dynamischen Charakters der Anlage und der Möglichkeit von Betriebsbedingungen, unter denen wahrscheinlich gefährliche Gase auftreten, auf die Ballasttanks von Schiffen gelegt werden. Die Entwicklung kinetischer Energie von losgelösten Anoden unter den letztgenannten Bedingungen erfordert besondere Aufmerksamkeit, siehe 8.6.

In Ballasttanks von Schiffen sollten Anoden an Versteifungen angebracht werden und nicht direkt an Mantelblechen. Anoden sollten an jedem Ende befestigt werden und nicht an einer einzelnen Stelle, ausgenommen kleine Anoden, die am niedrigsten Punkt von Ballasttanks montiert werden, die nicht vollständig entleert werden dürfen. Anoden dürfen nicht mit beiden Enden an Strukturen befestigt werden, die getrennten Relativbewegungen unterliegen [3].

Anoden müssen so angebracht werden, dass sie sich während des Betriebs nicht lösen können. Galvanische Anoden sollten vorzugsweise mittels Durchlaufschweißen mit dem Anodeneinsatz aus Stahl an der Anlage angebracht werden. Es darf nicht neben Spannungsauslösern wie z. B. am Fuß von Kehlnähten und am Übergang zwischen verschiedenen Stahlquerschnitten geschweißt werden. An Versteifungsflanschen sollten die Anodeneinsatz-Schweißnähte eine Linie mit der Versteifung bilden und sich oberhalb der Mittellinie des Geflechts befinden. Bei asymmetrischen Stahlquerschnitten darf sich die Schweißnaht auf dem Geflecht befinden, sollte jedoch nicht näher als 25 mm an die freie Kante des Geflechts heranreichen [19], [20], [21].

Am Boden des Tanks müssen die Anoden innerhalb von Abschnitten positioniert werden, die durch die Versteifungsgeflechte auf der Bodenfläche eingeschlossen sind, sie dürfen jedoch nicht an den Geflechten selbst angebracht werden, damit sichergestellt ist, dass sich die Anoden bei den niedrigsten Wasserständen stets im Meerwasser befinden. In Bild 3 ist hierzu ein Beispiel dargestellt.



Legende

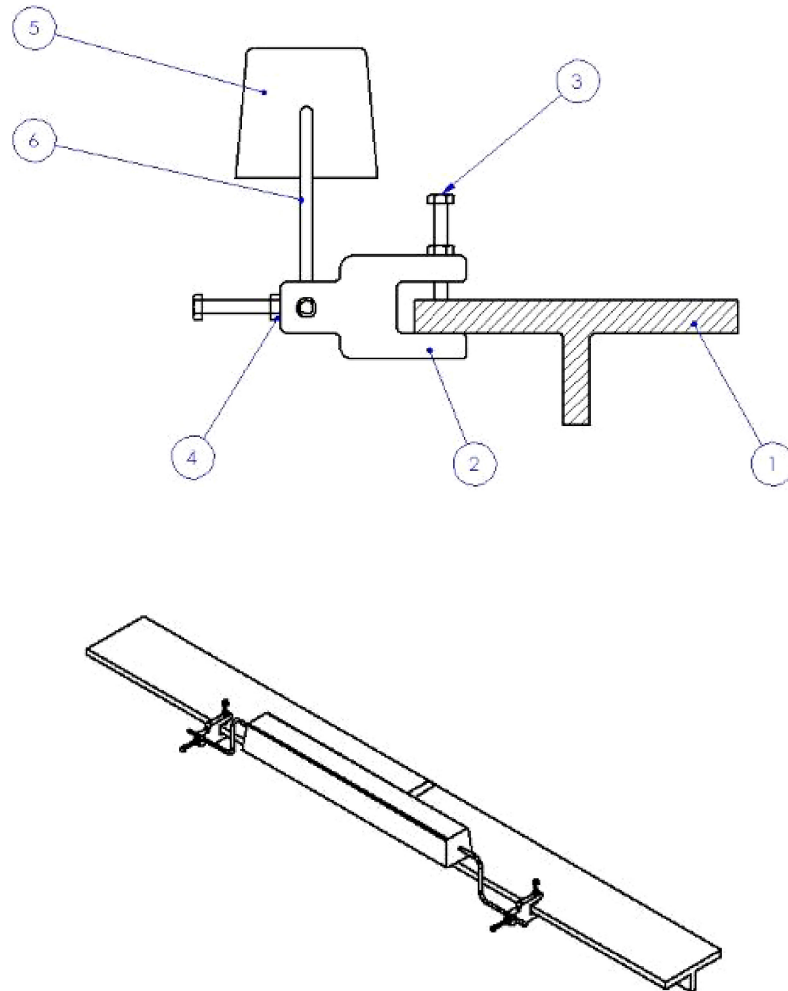
- 1 Versteifung an der Rahmenunterseite
- 2 Schäkel
- 3 Sicherungs- und Durchgangsbolzen
- 4 Anode
- 5 stabförmiger Stahleinsatz der Anode, der an den Schäkel angeschweißt wird
- 6 Bodenplatte des Tanks

Bild 3 — Beispiel für das Anbringen einer galvanischen Anode an der Versteifung eines Tankbodens

Die restlichen Anoden müssen über den Tankboden und die Wandbereiche verteilt werden, wobei der benetzte Bereich des Tanks berücksichtigt werden muss.

Galvanische Anoden sollten vorzugsweise mittels Durchlaufschweißen mit dem Anodeneinsatz aus Stahl an der Anlage angebracht werden. An den Schweißstellen sollten nur minimale Spannungen auftreten.

Der Stahleinsatz der galvanischen Anoden darf mit einzelnen Trägern verschraubt werden, die mittels Durchlaufschweißen mit der Anlage verbunden wurden. Anoden dürfen mit verschraubten Halterungen zugelassener Bauart an Flanschversteifungen angebracht werden (siehe Bild 4). In diesen Fällen müssen die Klemmbolzen mit zusätzlichen Feststellmuttern ausgestattet sein. Es muss eine Durchgangsprüfung durchgeführt werden und der Widerstand muss so sein, dass der Wert des ohmschen Spannungsabfalls weniger als 10 % des Treibpotentials beträgt und keinesfalls über 0,1 Ω liegt [18].



Legende

- 1 konstruktive Versteifung
- 2 Schraubklemme
- 3 Sicherungs- und Durchgangsbolzen
- 4 Klemm- und Durchgangsbolzen
- 5 Anode
- 6 stabförmiger Stahleinsatz der Anode

Bild 4 — Beispiel für die Verwendung von Klemmen bei der Montage einer galvanischen Anode in einem Tank

Das Anschweißen von Anoden oder Trägern muss in Übereinstimmung mit den relevanten Anforderungen nach EN ISO 15607 und EN ISO 15609-1 oder einer gleichwertigen Norm erfolgen.

ANMERKUNG 1 AWS D1.1/D1.1M ist eine annehmbare, gleichwertige Norm.

Schweißarbeiten müssen durch nach EN ISO 9606-1 qualifiziertes Schweißpersonal durchgeführt werden.

ANMERKUNG 2 AWS D1.1/D1.1M ist eine annehmbare, gleichwertige Norm.

Abweichende Verfahren für das Anbringen von Anoden müssen vorqualifiziert werden.

Die Innenfläche von oberflächenmontierten galvanischen Anoden darf beschichtet sein, bleibt i. d. R. jedoch unbeschichtet.

8.5.3 Rohre

Zur Montage von galvanischen Anoden für den Schutz innerhalb von Rohren wird i. d. R. eine Bohrung in das Rohr vorgenommen. Die Anode muss in einem wasserdichten Gehäuse vormontiert werden, das für den maximalen Auslegungsdruck des Rohrs ausgelegt ist (siehe Bild 5).

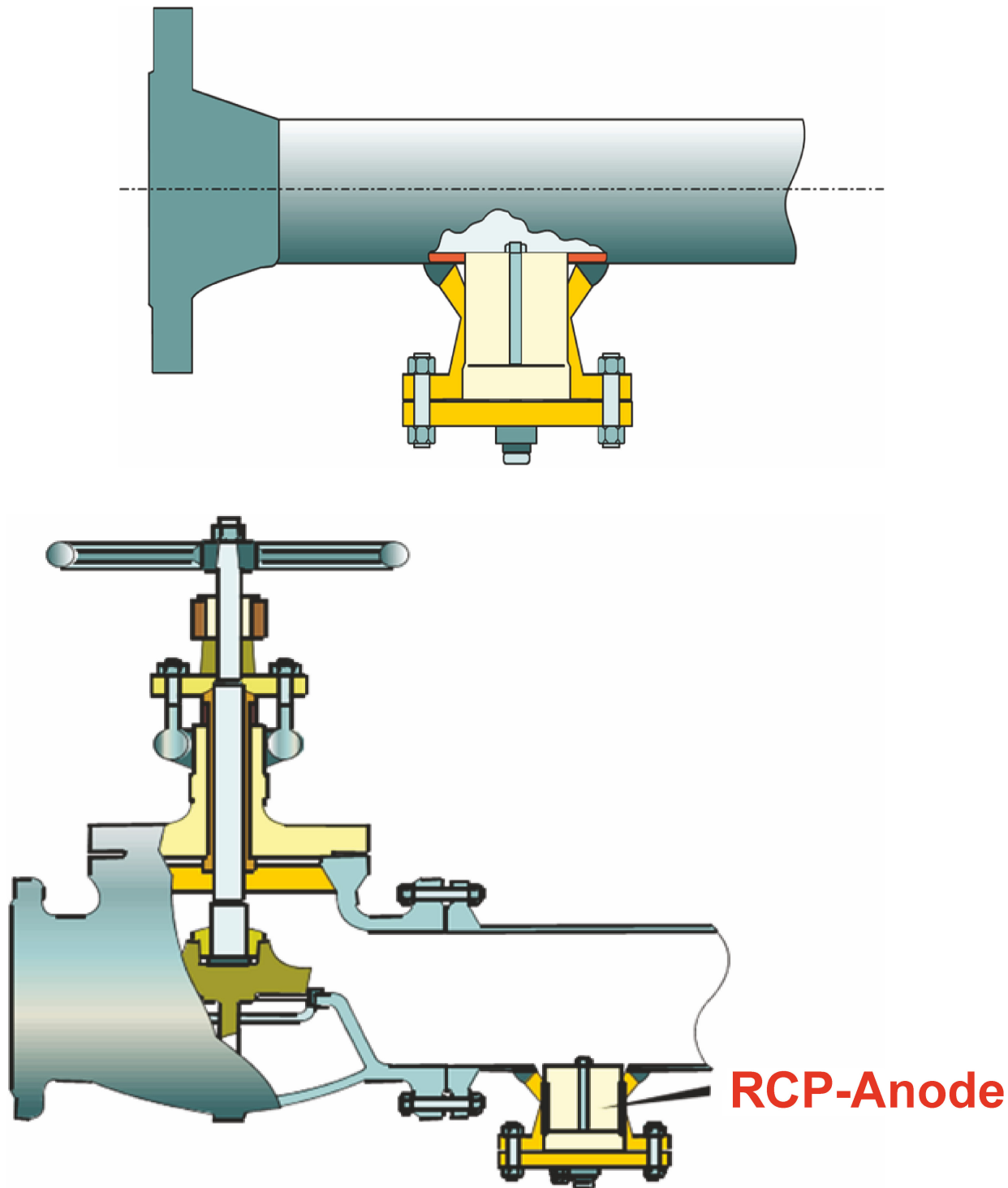
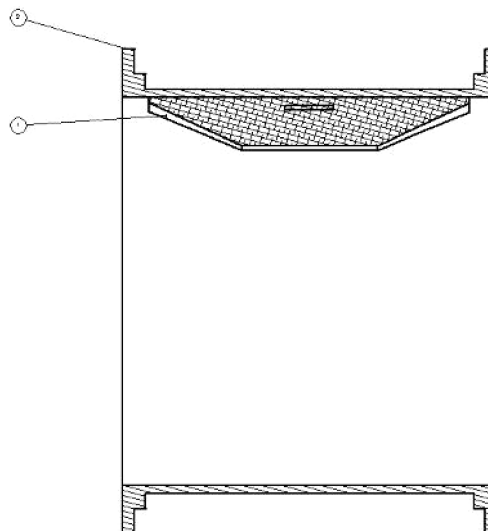
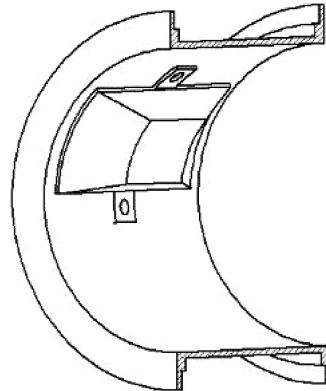


Bild 5 — Beispiel für die Bohrung in ein Rohr bei der Montage einer galvanischen Anode

Alternativ können galvanische Anoden in ein Zwischenstück aus Stahl montiert werden, das an das Rohr angeflanscht wird (siehe Bild 6).

Gewicht und Form der einzelnen Anoden können Beschränkungen aufgrund von Herstellungsverfahren und Handhabungsbedingungen unterliegen.



Legende

- 1 Anodensegment (ein einzelnes oder mehrere)
- 2 Zwischenstück im Rohr

Bild 6 — Beispiel für die Verwendung eines Zwischenstücks bei der Montage einer galvanischen Anode in einem Rohr

8.6 Auswahl, Positionierung und Montage von Anoden in Ballasttanks in der unmittelbaren Umgebung von anderen Tanks, in der explosive Gasgemische auftreten können

Bei Meerwasser enthaltenden Ballasttanks auf Schiffen und Produktions- und Lagereinheiten, wo es wahrscheinlich ist, dass aufgrund der Betriebsbedingungen explosive Gasgemische auftreten (z. B. in unmittelbarer Nähe von Öllagertanks) unterliegt die Auswahl und Positionierung galvanischer Anoden bestimmten Sicherheitsvorschriften [19],[20], [22], [23], [24], [25], [26].

Nach den Regeln der Klassifikationsgesellschaft ist die Verwendung von Magnesiumanoden verboten und die Höhe beschränkt, bis zu der Aluminiumanoden in Tanks auf Tankschiffen mit flüssiger Fracht mit einem Flammpunkt von unter 60 °C und in Ballasttanks montiert werden können, die sich in unmittelbarer Nähe zu Öltanks befinden. Aluminiumanoden dürfen nicht auf einer Höhe montiert werden, bei der eine kinetische Energie von mehr als 275 J freigesetzt wird, falls sich eine Anode löst. Dies gilt auch für die Höhe ab Tankboden, Deck oder dazwischen befindlichen Bauteilen, die wie folgt bestimmt wird:

$$H < 28/W \quad (8)$$

Dabei ist

H die Höhe, in m;

W das Bruttogewicht der Anode, in kg.

Für Zinkanoden gelten in Bezug auf die Höhe keine Beschränkungen.

9 Fremdstromsysteme

9.1 Allgemeines

Ein Fremdstromsystem liefert den für den kathodischen Korrosionsschutz einer Anlage aus Stahl erforderlichen Gleichstrom, indem sie an den Minuspol einer steuerbaren Stromquelle, üblicherweise ein Schutzgleichrichter, angeschlossen wird, und der Pluspol dieser Stromquelle mit einer oder mehreren Fremdstromanoden verbunden wird. Die Abmessungen, die Anzahl und die Positionen der Anoden müssen so bestimmt werden, dass der Strom zum Erreichen des kathodischen Korrosionsschutzes während der erwarteten Nutzungsdauer der Anlage über die gesamte Anlage verteilt wird.

Die Gleichstromquelle muss dazu geeignet sein, den maximalen Gesamtstrom I_t für den dadurch zu schützenden Bereich zu liefern, damit die in Abschnitt 6 festgelegten Schutzkriterien für die gesamte Oberfläche erreicht und aufrechterhalten werden.

Bei der Einstellung der Spannung müssen der Gesamtwiderstand des Stromkreises (Leitungen, Anoden und Quellenspannung) und die empfohlene Maximalbetriebsspannung der Anoden berücksichtigt werden. Bei platiniierten Anoden muss die Höhe der Restwelligkeit auf einen Effektivwert von 100 mV RMS begrenzt sein, und die Frequenz sollte nicht niedriger sein als 100 Hz, um die Auswirkungen auf die Verschleißrate zu beschränken (siehe Anhang E).

Gleichstromquellen mit Potentiostat-Steuerung müssen dazu geeignet sein, einen elektrischen Strom (konstant oder variabel) zu liefern, mit dem das erforderliche kathodische Schutzpotential erreicht wird (Sollpotential). Das Sollpotential kann von einer oder mehreren Bezugselektroden abgeleitet werden (siehe Abschnitt 6 zu Schutzkriterien).

Die Auslegungsberechnungen und Spezifikationen müssen detaillierte Informationen zu Folgendem enthalten:

- Auslegungsgrundlage;
- Größe der Anlagenteile, Oberflächenberechnungen;
- Anodenstrom und Berechnungen zur Lebensdauer einschließlich Spannungsabfall über Leitungen sowie Nennstromberechnungen;
- allgemeine Anordnung der Anlagenteile;
- Positionen der Anoden;
- Positionen der Bezugselektroden;
- Spezifikation der Anlagenteile, z. B. Gleichstromquelle, Anoden, Verbindungskabel, Anschlüsse, Schutzgeräte, Mess- und Bezugselektroden;
- Montagespezifikationen;
- Prüfung und Inbetriebnahme;
- Überwachungs- und Instandhaltungsspezifikation.

Es sollten Gleichstromquellen mit Potentiostat-Steuerung verwendet werden, um die Polarisierung unter stark schwankenden Umgebungsbedingungen aufrechtzuerhalten. Beispiele für starke Schwankungen sind Benetzung, Fließraten, schwankende Verdünnung von Meerwasser mit Süßwasser, Anlagenkonfiguration und Betriebsbedingungen.

Jeder kathodische Korrosionsschutzbereich (siehe 7.2.2) kann durch ein eigenes System geschützt werden. Ein Mehrzonen-Steuerungssystem kann erforderlich sein, um die Stromverteilung in bestimmten Bereichen zu optimieren, in denen besondere Bedingungen herrschen.

Bei Meerwasser enthaltenden Ballasttanks auf Schiffen und Produktions- und Lagereinheiten, wo es wahrscheinlich ist, dass aufgrund der Betriebsbedingungen explosive Gasgemische auftreten (z. B. in unmittelbarer Nähe von Öllagertanks) sind Fremdstromsysteme nach den Sicherheitsvorschriften nicht zulässig [19], [20], [22], [23], [24], [25], [26].

Der Auslegungsschutzstrom eines kathodischen Korrosionsschutzbereichs einer Anlage muss auf der Grundlage des maximalen Strombedarfs $I_{\max}$ nach 7.2.4.1 und/oder 7.2.5.1 berechnet werden. Um eine weniger wirksame Stromverteilung auszugleichen (im Vergleich zu einem galvanischen Anodensystem kleine Anzahl von Anoden für höhere Ströme), muss das kathodische Korrosionsschutzsystem so ausgelegt sein, dass ein stärkerer Strom als der berechnete, maximale Gesamtstrombedarf bereitgestellt werden kann (i. d. R. das 1,5-Fache, je nach Geometrie und Beschichtung der Anlage). In der Auslegung muss die Möglichkeit eines vorzeitigen Ausfalls des Anodensystems berücksichtigt und der Einsatz zusätzlicher Schutzgleichrichter ermöglicht werden, damit Veränderungen an externen Stromkreisen und eine Erweiterung der Anodenanzahl möglich sind.

Anoden müssen entweder für die Nutzungsdauer der Anlage ausgelegt oder austauschbar sein. Bei den mit Fremdstromsystemen verwendeten Anoden handelt es sich i. d. R. um unlösliche Anoden. Sie bestehen üblicherweise aus Titan, Niob oder Tantal und weisen eine dünne Beschichtung aus Platin oder Mischmetalloxiden auf, die eine Entladung des elektrischen Stroms ermöglicht.

Halblösliche Anoden aus Chrom-Silizium-Eisen-Legierungen dürfen verwendet werden, vorausgesetzt, die maximale Anodenstromdichte beträgt nicht mehr als $30 \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$.

Typische elektrochemische Merkmale von Fremdstromanoden sind in Anhang E angegeben.

Da die Anzahl von Fremdstromanoden im Vergleich zu galvanischen Systemen im Allgemeinen kleiner ist, kann die Leistung des Systems durch den Verlust oder Ausfall einer Anode erheblich reduziert werden. Folglich müssen die Anodenbaugruppen und ihre Befestigungen so ausgelegt sein, dass die mechanische und elektrische Integrität sichergestellt sind. Es müssen alle möglichen Vorkehrungen getroffen werden, um einen direkten elektrischen Kontakt (Kurzschluss des kathodischen Korrosionsschutzstromkreises) zwischen den Anoden und der Anlage während der gesamten Nutzungsdauer der Anlage zu vermeiden.

Bei Überschuss des die ICCP-Anoden umgebenden Bereichs müssen beispielsweise ein dielektrischer Schutzschild eingesetzt oder die Anodenstromdichte verringert werden (d. h. Verwendung einer größeren Anzahl von Anoden).

9.2 Positionen der Anoden und Montage

9.2.1 Allgemeines

Die Anoden müssen so an der Anlage positioniert werden, dass die Stromverteilung die Auslegungsanforderungen über die gesamte Oberfläche erfüllt.

Bei den meisten für den kathodischen Korrosionsschutz im Inneren von Anlagen eingesetzten Fremdstromsystemen ist der ausschlaggebende Faktor bei der Bestimmung des Gesamtwiderstands des Stromkreises der Anode-Elektrolyt-Widerstand.

Bei unterschiedlichen zu schützenden Anlagen gelten jeweils spezifische Anforderungen und Empfehlungen für die Positionierung und Montage von Anoden.

9.2.2 Tanks und Anlagen mit ebenen Oberflächen

9.2.2.1 Allgemeines

Bei Wassertanks werden die Anoden i. d. R. kreisförmig angeordnet. Ein empirisches Verfahren für die Auslegung eines derartigen Fremdstromsystems ist in F.1 gegeben.

9.2.2.2 Zeitlich begrenzt eingesetzte Systeme für die hydrostatische Druckprüfung von Tanks unter Verwendung von Meerwasser

Die Anoden können zu Strängen verbunden werden und in senkrechter Aufhängung am Tankdach angebracht werden, sodass sie sich im Wasser und in einiger Entfernung von der Metalloberfläche befinden (siehe F.1). Die Anordnung der Anoden wird so ausgelegt, dass für den kathodischen Korrosionsschutz während der erwarteten Nutzungsdauer der Anlage eine gleichmäßige Stromverteilung über alle benetzten Oberflächen erreicht wird. Falls der Tankboden einer besonderen Korrosionsgefahr unterliegt, z. B. an Schweißnähten an Stellen, wo die senkrechten Wände auf die Bodenwand des Tanks treffen, kann mit isolierten Trägersystemen eine zusätzliche Anordnung von Anoden in unmittelbarer Nähe des Tankbodens platziert werden. Es können Silizium-Gusseisen-Anoden oder aktivierte Titananoden verwendet werden.

9.2.2.3 Rohrbündelkondensatoren und Wärmetauscher

Bei großen Kondensatoren kann die Verwendung von einzelnen Gleichstromquellen mit getrennter Steuerung und jeweils eigenen Messelektroden erforderlich sein, damit die für die verschiedenen Bereiche der Röhrchenplatte erforderlichen Schutzstromdichten separat eingestellt werden können.

Graphitanoden und Silizium-Gusseisen-Anoden können aufgrund ihrer Größe und hohen n ungeeignet sein. Es können Anoden aus platinisiertem Titan, Mischmetalloxid-Titananoden oder Stabanoden aus platinisiertem Niob mit Kupferkern verwendet werden. Die mechanische Festigkeit dieser Stabanoden muss hinsichtlich der durch das fließende Wasser ausgeübten mechanischen Kräfte bewertet werden, um die zulässige Länge der in Wasser getauchten Stabanoden festzulegen [27]. Dabei müssen zwei Faktoren betrachtet werden: Widerstandskraft und Vibration. Durch die einwirkende Widerstandskraft wird der Stab in Fließrichtung des Wassers gebogen. Die Vibration des Stabs erfolgt quer zur Fließrichtung des Wassers.

Ein Verfahren zur Bestimmung der Länge von Stabanoden ist in F.2 gegeben. Bei diesen Berechnungen werden die Auswirkungen von Turbulenzen, Geschwindigkeitsgefälle und Druckgefälle wie z. B. Druckstöße nicht berücksichtigt. Aus diesem Grund sollte die bei der Berechnung nach F.2 verwendete Geschwindigkeit v die maximale Auslegungsgeschwindigkeit multipliziert mit einem Sicherheitsfaktor von mindestens 3 sein.

9.2.2.4 Filter

Die Verwendung von einzelnen Gleichstromquellen mit getrennter Steuerung und jeweils eigenen Messelektroden kann erforderlich sein, damit die für die verschiedenen Bereiche des Filters erforderlichen Schutzstromdichten separat eingestellt werden können.

9.2.3 Rohre

Bei der Auslegung von Fremdstromanoden für die Montage in einem Rohrleitungssystem müssen Fließgeschwindigkeit und Turbulenz des Wassers, Ermüdung, Erosion und das Vorhandensein von Feststoffpartikeln (z. B. Sand) in Betracht gezogen werden.

Fremdstromanodensysteme bestehen aus innerhalb der Rohrleitungen verteilten, i. d. R. in gleichmäßigen Abständen angeordneten, Stabanoden. Die Abstände zwischen den Stabanoden (und ihre Anzahl) sind abhängig vom Rohrdurchmesser, von der Beschichtung, falls vorhanden, der Fließgeschwindigkeit des Meerwassers (oder Brackwassers), der Temperatur, dem spezifischen Widerstand und dem Anodenredundanzfaktor. Die Abstände zwischen den Stabanoden müssen so bemessen sein, dass ein kathodischer Korrosionsschutz erreicht und aufrechterhalten werden kann und Überschutz vermieden wird.

Zumeist kommen unlösliche Fremdstromanoden, z. B. Anoden aus platinisiertem Titan und Mischmetalloxid-Titananoden, zum Einsatz. Da die Ermüdungsfestigkeit von Niobstäben mit Kupferkern etwa die Hälfte der Ermüdungsfestigkeit von Titan beträgt und ihr Elastizitätsmodul ebenfalls ist, können Anoden aus platinisiertem Niob mit Kupferkern verwendet werden, wenn ein Nachweis ihrer mechanischen Festigkeit vorliegt.

Die Gefahr mechanischer Beschädigungen an innerhalb von Rohrleitungen befindlichen Anoden steigt mit zunehmender Geschwindigkeit und/oder Turbulenz des Wasserstroms deutlich an. Ein Verfahren zur Bestimmung der Länge von Stabanoden ist in F.2 gegeben. Bei diesen Berechnungen werden die Auswirkungen von Turbulenzen oder Geschwindigkeitsgefällen nicht berücksichtigt. Folglich wird ein Sicherheitsfaktor von 3 für die zur Berechnung verwendete Fließgeschwindigkeit empfohlen.

Ein Anodenredundanzfaktor nach 7.3.1 kann berücksichtigt werden.

Alternativ zum Redundanzfaktor kann der über die einzelnen Anoden bereitgestellte Strom erhöht werden, vorausgesetzt, dass beim Ausfall einer Anode weiterhin ein annehmbarer Potentialbereich erreicht wird, der durch Berechnungen oder Messungen nachgewiesen ist.

Zur Montage von Fremdstromanoden für den Schutz innerhalb von Rohren kann eine Bohrung in das Rohr erfolgen. Die Anode muss in einem wasserdichten Gehäuse vormontiert werden, das für den maximalen Auslegungsdruck des Rohrs ausgelegt ist. Eine elektrische Trennung muss sichergestellt sein.

Bild 7 zeigt eine Halterung aus faserverstärktem Polymerwerkstoff (FVP) mit einem Gewindenippel aus nichtrostendem Stahl für eine Mischmetalloxid-Stabanode, die für $15 \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$ über eine 15-jährige Lebensdauer ausgelegt ist. Diese Art von Baugruppe hat sich als beständig gegenüber Drücken von mehr als 10 bar erwiesen.