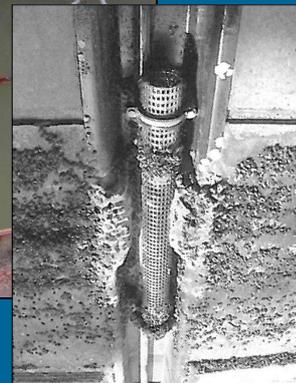
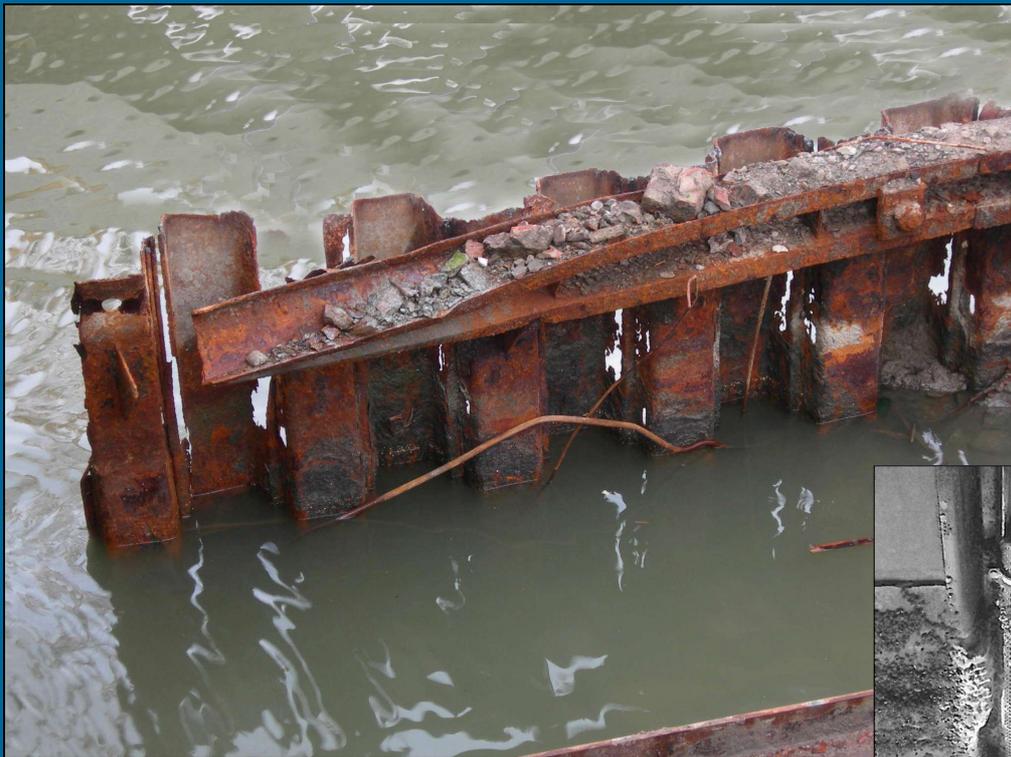


# Kathodischer Korrosionsschutz im Wasserbau



**Hafentechnische  
Gesellschaft e.V., Hamburg**



**Fachausschuss für  
Korrosionsfragen**

**3. Auflage 2009**

## 1. Vorwort

Im Jahre 1981 hat der Fachausschuss für Korrosionsfragen (FA KOR) der Hafentechnischen Gesellschaft e.V. (HTG) die Broschüre „Kathodischer Korrosionsschutz im Wasserbau“ herausgegeben, welche 1989 als 2. Auflage überarbeitet worden ist. Danach hat sich der Fachausschuss mit einem weiteren Thema des elektrochemischen Korrosionsschutzes beschäftigt und ein Handbuch für den Schutz von Stahl in Beton (Ausgabe 1994, englische Fassung 1999) erarbeitet.

Die technischen Neuerungen gaben den Ausschlag, das vielgeschätzte Handbuch von 1989 zu überarbeiten. Vor allem die Entwicklung in der Elektronik wie auch in der digitalen Technik, mit all den Datenübermittlungsmöglichkeiten, hat den Ausschlag für eine Neufassung gegeben. Letztlich wurden aber alle Kapitel derartig gründlich überarbeitet, so dass ein recht stattliches Werk entstanden ist. Hervorzuheben sind die Ausformulierungen bestimmter Grundsätze und technischer Verfahrensweisen sowie deren bildliche Erklärungen. Zudem sind physikalische Grundlagen der Elektrotechnik ausführlich erläutert und mit Formeln belegt.

Der Kathodische Korrosionsschutz im Wasserbau ist eine hervorragende Ergänzung des passiven Schutzes (Beschichtung). Zusammen können sie die Schutzdauer erheblich verlängern. In den letzten Jahren sind zudem zwei wesentliche Gesichtspunkte in den Vordergrund getreten, welche dieser elektrochemischen Schutzmethode zusätzliches Gewicht verleihen:

- Zunahme von Beschichtungsschäden und
- Unbeabsichtigte Korrosionselementbildung durch den Einsatz von Chrom-Nickel-Stahl.

Hierbei haben sich sowohl Fremdstrom- und galvanische Schutzanlagen als Reparaturmaßnahme bestens bewährt.

Mit dem vorgelegten Kompendium erhofft sich der Fachausschuss weiterhin eine gute Resonanz zum Einsatz der vorgestellten Schutzmethode, zudem es, neben den Fachingenieuren, gezielt für Bauwerksbesitzer, Ausführende und nicht zuletzt für den planenden Ingenieur ausgerichtet ist.

Zur Erarbeitung des vorgelegten Bandes haben die Mitglieder des Fachausschusses für Korrosionsfragen der Hafentechnischen Gesellschaft

- Manfred Baumann, Wusterwitz
- Dr. Günter Binder, Karlsruhe
- Dr. Christoph Bosch, Duisburg
- Norbert Fischer, Trier
- Dr. Matthias Graff, Nordborg
- Detlev Haaße, Hamburg
- Oliver Heins, Hamburg
- Bernhard Hiller, Asperg
- Hermann Jonetzki, Hamburg
- Torsten Krebs, Essen
- Joachim Pflugfelder, Stuttgart
- Hans-Joachim Uhlendorf, Oldenburg

- Dipl.-Ing. Andreas Wachholz, Hamburg

beigetragen. Ihnen sei an dieser Stelle nochmals recht herzlich gedankt, ist es mit der Herausgabe des Handbuches, trotz vielfältigster beruflicher Belastungen und Verpflichtungen, gelungen ein umfangreiches, detailliertes Handbuch zu erstellen, welches zur weiteren Verbreitung dieser Schutzmethode beitragen soll.

Karlsruhe, im Dezember 2009

Dr. Günter Binder  
(Vorsitzender)

# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Vorwort</b> .....	<b>1</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>3</b>
<b>2. Geschichtliche Entwicklung</b> .....	<b>8</b>
2.1 Die Entdeckung der Korrosion .....	8
2.2 Entwicklung des kathodischen Korrosionsschutzes .....	8
<b>3. Gebräuchliche Begriffe für den Kathodischen Korrosionsschutz (KKS)</b> .....	<b>15</b>
<b>4. Richtlinien, Normen und Standards</b> .....	<b>23</b>
<b>5. Grundlagen der elektrochemischen Korrosion</b> .....	<b>26</b>
5.1 Thermodynamische Betrachtungen zur Stabilität von Eisen .....	26
5.2 Elektrochemische Korrosion .....	26
5.2.1 Elektrochemische Teilreaktionen .....	27
5.2.2 Anodische Teilreaktion .....	27
5.2.3 Kathodische Teilreaktion .....	28
5.2.4 Korrosionszelle .....	29
5.2.5 Elektroden.....	30
5.3 Einflussgrößen für den Ablauf der Korrosion.....	32
5.3.1 Passivierung .....	32
5.3.2 Elektrochemische Spannungsreihe .....	32
5.3.3 Einfluss des Elektrolyten .....	34
5.3.4 Abtrag gemäß Faraday'schem Gesetz.....	34
5.3.5 Flächenverhältnis .....	36
5.3.6 Streuströme .....	36
5.3.7 Fremdkathoden .....	36
5.4 Korrosionsursachen und ihre Erscheinungsformen.....	37
5.5 Sonstige Korrosionsmechanismen .....	41

<b>6.</b>	<b>Korrosionsschutz</b> .....	<b>43</b>
6.1	Kathodischer Korrosionsschutz (Wirkungsweise des passiven und aktiven Korrosionsschutzes) .....	43
6.1.1	Wirkungsweise kathodischer Korrosionsschutzanlagen .....	43
6.1.2	Das Potential als Beurteilungskriterium.....	45
6.1.3	Schutzsysteme .....	45
6.1.4	Technische Vor- und Nachteile beider Schutzsysteme.....	47
6.2	Beschichtungen und deren Beeinflussung durch kathodische Korrosionsschutzverfahren.	50
6.2.1	Beschichtungen auf Stahlwasserbauteilen.....	50
6.2.2	Kathodischer Korrosionsschutz beschichteter Stahlwasserbauteile.....	52
6.2.3	Überprüfung der Verträglichkeit von Beschichtungen mit dem kathodischen Korrosionsschutz.....	54
<b>7.</b>	<b>Grundlagen der elektrischen Messtechnik</b> .....	<b>58</b>
7.1	Elektrische Messgrößen .....	58
7.2	Potentialmessung .....	59
7.2.1	Potential Metall / Elektrolyt .....	59
7.2.2	Bezugselektroden (Referenzelektroden).....	65
7.2.3	Potentialbereiche von Bezugselektroden .....	69
7.2.4	Messgeräte .....	70
7.2.5	Messtechnischer Aufbau .....	70
7.2.6	Maßnahmen zur Durchführung der Messungen .....	73
7.3	Strommessung.....	78
7.3.1	Allgemeines zur Strommessung.....	78
7.3.2	Messgeräte .....	78
7.3.3	Bestimmung der Schutzstromdichte.....	78
7.4	Widerstandmessung .....	85
7.4.1	Messgeräte .....	86

7.4.2	Direkte spezifische Widerstandsmessung (Soilbox) .....	86
7.4.3	Indirekte spezifische Widerstandsmessung (Schlumberger-Wenner-Verfahren) .....	88
7.4.4	Leitfähigkeitsmessung des Wassers .....	91
7.4.5	Übergangswiderstandsmessung .....	92
7.4.6	Ausbreitungswiderstandsmessung.....	92
<b>8.</b>	<b>Voruntersuchungen bzw. Vorausmessungen .....</b>	<b>94</b>
8.1	Allgemeines .....	94
8.2	Untersuchung der Korrosionsbelastung .....	96
8.2.1	Allgemeine Einflüsse aus dem Wasser .....	96
8.2.2	Besondere Verhältnisse in Flussmündungen (Aestuarien) .....	98
8.2.3	Gefährdungspotential für Niedrigwasserkorrosion .....	99
8.2.4	Messung von Korrosionsabträgen.....	100
8.3	Potentialmessungen .....	105
8.3.1	Allgemeines .....	105
8.3.2	Durchführung der Potentialmessungen.....	106
8.4	Untersuchung des Schutzstrombedarfs.....	106
<b>9.</b>	<b>Auslegung eines Korrosionsschutzsystems .....</b>	<b>107</b>
9.1	Allgemeine Planungsgrundsätze .....	107
9.1.1	Betriebsbedingungen des Bauwerkes.....	110
9.1.2	Zu schützende Oberflächen .....	110
9.1.3	Einfluss der Beschichtung .....	110
9.1.4	Schutzstromdichten .....	110
9.1.5	Wasserseitige Einflussgrößen.....	111
9.1.6	Potentiale und Potentialbegrenzung .....	112
9.1.7	Lebensdauer der Anoden .....	112
<b>10.</b>	<b>Schutzverfahren mit galvanischen Anoden .....</b>	<b>114</b>
10.1	Allgemeine Grundsätze.....	114

10.2	Anodenlegierungen, Anodenformen .....	116
10.2.1	Allgemeines .....	116
10.2.2	Anoden .....	117
10.3	Bemessung der Schutzanlagen .....	119
<b>11.</b>	<b>Schutzverfahren mittels Fremdstrom .....</b>	<b>121</b>
11.1	Bautechnische Voraussetzungen .....	121
11.1.1	Kathodenlängsleitfähigkeit.....	121
11.1.2	Verhinderung von Elementbildung .....	123
11.1.3	Stand- und Einbauorte von KKS - Bauteilen .....	123
11.1.4	Kabelwege .....	134
11.2	Auswahl der Bauteile .....	135
11.2.1	Schutzstromgeräte .....	135
11.2.2	Anoden und Anodenhalterungen.....	144
11.2.3	Bezugselektroden und Halterungen .....	151
11.2.4	Kabel, Kabelverbindungen und Schutzrohre.....	151
11.2.5	Klemm- und Verbindungskästen .....	152
11.2.6	Überwachungs- und Steuerungssysteme .....	152
11.3	Berechnungen und Dimensionierung .....	153
11.3.1	Oberflächen .....	153
11.3.2	Schutzstrombedarf .....	153
11.3.3	Anzahl der Schutzbereiche.....	154
11.3.4	Anzahl und Ausgangsleistung der Schutzstromgeräte .....	154
11.3.5	Erforderliche Anodenlebensdauer .....	155
11.3.6	Auswahl und Dimensionierung der Anoden .....	155
11.3.7	Ausbreitungswiderstand einer Anode.....	156
11.3.8	Schutzbereich einer Anode .....	156
11.3.9	Berechnung der Gesamtanodenzahl eines Schutzbereiches .....	157

11.3.10	Errechnete Lebensdauer der Anodenanlage .....	157
11.3.11	Auswahl und Anzahl der Referenzelektroden.....	157
11.3.12	Auswahl der Kabeltypen .....	158
11.3.13	Länge und Querschnitt der Kabel .....	158
11.3.14	Klemm- und Verteilerkästen.....	159
<b>12.</b>	<b>Schutz von Binnenwasserbauwerken .....</b>	<b>160</b>
12.1	Allgemeine Grundsätze.....	160
12.2	Schleusentore, Schütze .....	163
12.3	Wehre.....	164
12.4	Kanalbrücken, Hebewerkströge.....	164
12.5	Sonstige Bauwerke .....	165
<b>13.</b>	<b>Sondermaßnahmen .....</b>	<b>166</b>
13.1	Streustrombeeinflussungen .....	166
13.1.1	Externe Streuströme.....	166
13.1.2	Interne Streuströme.....	168
13.2	Explosionsgefährdete Bereiche .....	170
<b>14.</b>	<b>Wartung, Überwachung und Steuerung .....</b>	<b>171</b>
14.1	Wartung .....	171
14.2	Überwachung und Steuerung .....	172
14.2.1	Komponenten einer Fernüberwachungs- und Steuerungsanlage .....	172
14.2.2	Vorteile einer Fernsteuerung.....	174

## **2. Geschichtliche Entwicklung**

### **2.1 Die Entdeckung der Korrosion**

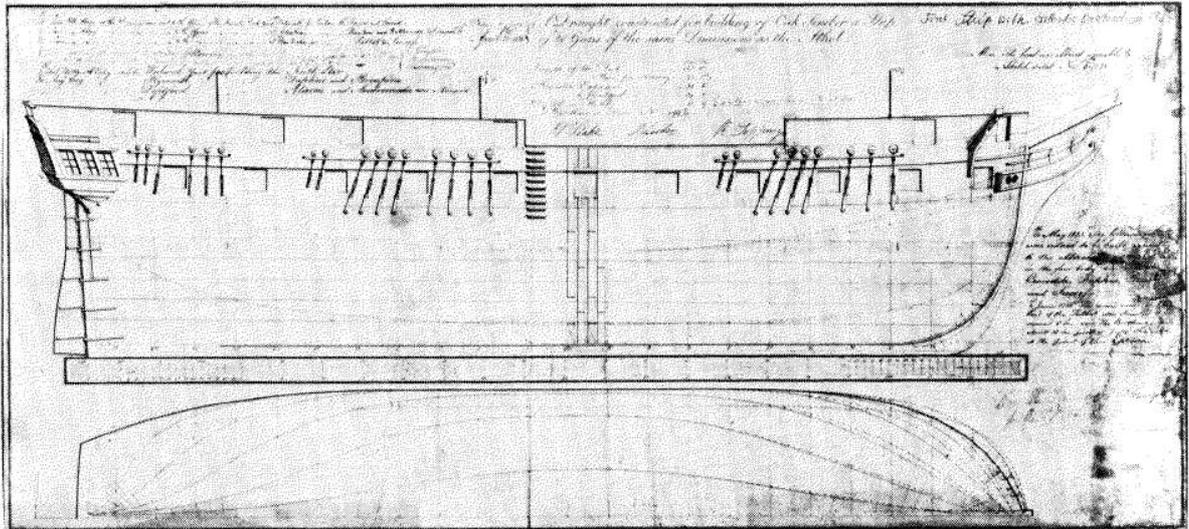
Der griechische Philosoph Plato (427-347 v. Chr.) berichtet in überlieferten Aufzeichnungen bereits über „Rost als das Erdige, das sich aus Metall ausscheidet“. An einem alten römischen Schiffswrack ergaben Untersuchungen, dass schon damals Kontaktkorrosion zwischen Bleiplatten, die zum Schutz vor Bohrwürmern auf die Außenhaut montiert wurden, und den zur Befestigung eingeschlagenen Kupfernägeln verhindert wurde, indem die Kupfernägel ebenfalls mit Blei überzogen wurden. 70 v. Chr. erwähnt Plinius Bitumen, Pech, Bleiweiß und Gips als Korrosionsschutzmittel für Eisen und Bronze.

2000 Jahre nachdem Plato den Rost definierte, übernahm Georg Agricola in seinem Werk „De natura fossilium“ die Ansicht: „Der Eisenrost ist sozusagen eine Ausscheidung des metallischen Eisens. Man schützt das Eisen gegen diesen Fehler durch mancherlei Umhüllungsmittel, wie Mennige, Bleiweiß, Gips, Bitumen und Teer“.

Der Begriff Korrosion, abgeleitet vom lateinischen *corrodere* (zernagen, zerstören), wurde erstmals 1667 in den „Philosophical Transaction“ veröffentlicht. In Deutschland tauchte er 1785 in einer Übersetzung aus dem Französischen über die Bleiweißherstellung (basisches Bleicarbonat,  $2 \text{PbCO}_3 \cdot \text{Pb(OH)}_2$ ) auf.

### **2.2 Entwicklung des kathodischen Korrosionsschutzes**

Das Prinzip des kathodischen Korrosionsschutzes geht auf wissenschaftliche Untersuchungen des Engländers Sir Humphrey Davy zurück, der nach theoretischen Untersuchungen im Auftrag der britischen Admiralität im Labor Versuche durchführte, um die Kupferverkleidungen britischer Kriegsschiffe mit Zink und Eisen vor Korrosion zu schützen. Dazu tauchte er polierte Kupferplatten, mit und ohne aufgelötete Zinnstück in leicht angesäuertes Meerwasser. Er stellte fest, dass die Platten ohne Zinn schon nach drei Tagen zu korrodieren begannen, die Platten mit Zinn jedoch nicht. Die gleichen Versuche führte er mit angebrachten Eisen- und Zinkstücken durch. Bei der Kombination von Eisen, Zink und Kupfer stellte er fest, dass nicht nur das Kupfer geschützt wurde, sondern ebenfalls auch das Eisen. Diese Erkenntnisse aus den Laborversuchen setzte Davy dann in die Praxis um und rüstete mehrere kupferverkleidete Schiffe im Jahr 1824 mit Gusseisen- oder Zinkplatten aus (Abb. 2.1). Alle Schiffe kamen von ihren mehrere Monate dauernden Reisen mit fast unbeschädigten Kupferverkleidungen wieder zurück.



**Abb. 2.1:** Zeichnung des Schiffes Sammarang das von März 1824 bis Januar 1825 mit einer kathodischen Schutzanlage (Opferanoden) eine Seereise nach Kanada unternahm [1]

Thenard äußerte zum ersten Mal im Jahre 1819 die Vermutung, dass Rosten ein elektrisches Phänomen sei.

Ein Schüler Davys war Michael Faraday, der auch an vielen Versuchen Davys mitwirkte. Dieser entdeckte 1834 das Äquivalentgesetz (quantitativer Zusammenhang zwischen Korrosionsabtrag und elektrischem Strom) und schaffte dadurch die wissenschaftliche Grundlage der Elektrolyse und im Prinzip auch des kathodischen Schutzes.

Ebenfalls erwähnt werden muss der Telegraphen-Inspektor C. Frischen [Frischen, C: Zeitschrift des Architekten- und Ingenieurvereins für das Königreich von Hannover 3, 14 (1857)]. Dieser machte, scheinbar ohne die Erkenntnisse von Davy, 1856 Versuche zum Schutz von „Schleusen und Thoren“, indem er Eisen im Meerwasser mit Zink kombinierte und kam zu dem Schluss, dass ein wirksamer Schutz des Eisens durch Einwirkung galvanischer Elektrizität kaum noch zweifelhaft ist.

Die ersten, relativ unbekanntenen Versuche mit kathodischen Fremdströmanlagen machte Thomas Elva Edison um 1890. Leider schlugen die Versuche aufgrund unzulänglicher Stromquellen und Anodenmaterial fehl.

In der Marine-Rundschau von 1898 [4] berichtet der Oberingenieur Diegel über umfangreiche Versuche mit Kupferlegierungen in Seewasser (Abb. 2.2). Aus seinen Versuchen stellte er eine Spannungsreihe der untersuchten Legierungen auf und folgte:

10. Im Allgemeinen lassen die Ergebnisse erkennen, daß eine rasche Zerstörung der Kupferlegierungen und der mit ihnen im Seewasser in Berührung stehenden Metalle am wirksamsten verhindert wird, wenn man die Legierungen und Metalle so auswählt, daß dieselben in der elektrischen Spannungsreihe dicht beieinander liegen, sofern eine Isolation der einzelnen Metalle voneinander nicht möglich ist.

Jedenfalls müssen immer beide miteinander in Berührung stehenden Metalle berücksichtigt werden, damit nicht die beabsichtigte gute Erhaltung des einen Theiles dem damit verbundenen zweiten Stücke zum Schaden gereicht. So halten sich z. B. Zinn- und Eisenbronze in Berührung mit Eisen beide gleich gut, das Eisen wird aber am wenigsten leiden, wenn es mit Eisenbronze in Berührung steht.

Unter Umständen kann es auch erwünscht sein, die etwas raschere Zerstörung des einen genügend starken Theiles mit in den Kauf zu nehmen, um einen anderen subtileren Theil dadurch zu schützen. In solchen Fällen würde die Verwendung von Eisenbronze zweckmäßig sein, wenn man nicht Eisen oder reines Zink als Schutzmittel anwenden kann oder will. Außerdem erscheint die Verwendung von zinkreichen Legierungen nur dann zulässig, wenn dieselben nicht in leitender Verbindung mit anderen Kupferlegierungen stehen.

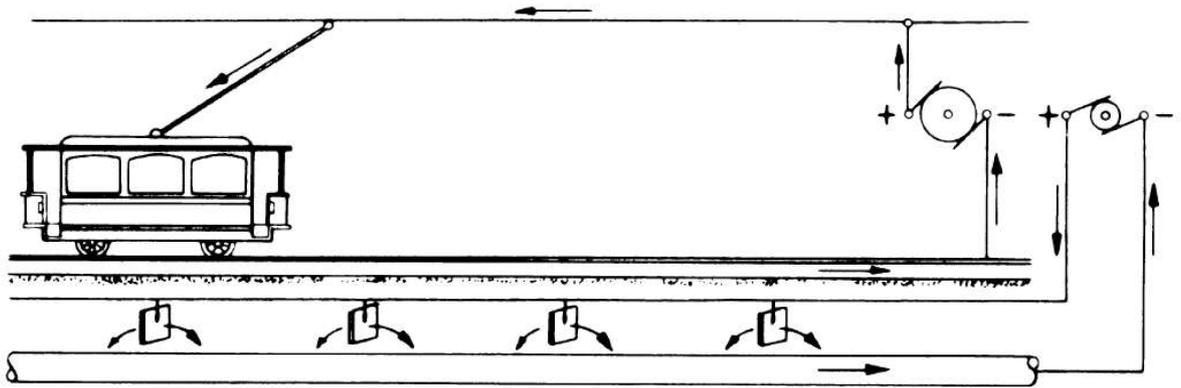
Die reine Aluminiumbronze scheint sich für Theile, welche dem Seewasser ausgesetzt sind, besonders gut zu eignen, da sie weder in Berührung mit elektrisch negativeren Metallen selbst beträchtlich leidet, noch eine rasche Zerstörung der mit ihr leitend verbundenen elektrisch positiveren Metalle herbeiführt. (Vergleiche in Tabelle 28 laufende Nummern 16 und 18, sowie 15 und 7, letztere gegenüber Nr. 3.)

**Abb. 2.2:** Auszug aus dem Versuchsbericht von Oberingenieur Diegel, Marine-Rundschau von 1898, Heft 11 [4]

Diegel weist in seinem Bericht außerdem auf Untersuchungen der königlichen Versuchsanstalten in Berlin von 1885 hin. Damals schloss Professor Finkener aus seinen Versuchen, dass der elektrische Strom bei der Zerstörung von Metallen in Seewasser eine große Rolle spielt.

K. Cohen gelang es 1902 das kathodische Schutzverfahren mit Gleichstrom praktisch durchzuführen.

Die erste Rohrleitung, die durch eine kathodische Korrosionsschutzanlage geschützt wurde, richtete der Betriebsdirektor der Stadtwerke Karlsruhe, Herbert Geppert, 1906 ein. Die 300 m langen Gas- und Wasserleitungen wurden im Einflussbereich einer Straßenbahnlinie durch einen Gleichstromgenerator und Fremdstromanoden geschützt (Abb. 2.3). Das Prinzip diese Anlage ließ er sich daraufhin 1908 patentieren.



**Abb. 2.3:** Kathodischer Fremdstromschutz bei Streuströmen nach Geppert, 1908 [2]

Robert J. Kuhn verhinderte 1928 die Korrosion an Ferngasleitungen in New Orleans durch die Installation eines kathodischen Schutzgleichrichters und erzielte damit den Durchbruch für die praktische Anwendung des kathodischen Schutzes für Rohrleitungen. Die praktische Umsetzung dieses Schutzsystems machte ihn zum „Vater des kathodischen Schutzes“ in den USA. Das ausreichende Schutzpotential von  $-0,85\text{V}$  gegen eine gesättigte Kupfer/Kupfersulfat-Elektrode ermittelte Kuhn aus eigenen Versuchen. Dieses Versuchsergebnis gab er auf der ersten Korrosionsschutzkonferenz 1929 bekannt und wies darauf hin, „dass dieser Wert das entscheidende Potentialkriterium für den kathodischen Schutz darstellt“. Für herausragende Leistungen auf dem Gebiet des kathodischen Korrosionsschutzes wird durch den Fachverband kathodischer Korrosionsschutz e.V. (FKKS) regelmäßig die Robert J. Kuhn Medaille (Abb. 2.4) verliehen.



**Abb. 2.4:** Kuhn-Ehrenmedaille für Verdienste auf dem Gebiet des kathodischen Korrosionsschutzes [5]

Nach dem II. Weltkrieg begann man mit elektrochemischen Untersuchungsverfahren und kam zu der Erkenntnis, dass das Potential eine wichtige Variable bei der Korrosionsreaktion darstellt.

Die ersten elektronischen Potentiostaten wurden Mitte des 19. Jahrhunderts entwickelt, wodurch die messtechnischen Voraussetzungen für eine systematische Untersuchung der Potentialabhängigkeiten von Korrosionsgrößen gegeben waren. Dadurch konnten auch kritische Grenzpotentiale bestimmter Korrosionserscheinungen erkannt und daraus Schutzpotentiale abgeleitet werden.

Es folgte viel Forschungsarbeit zur umfassenden Darstellung der Wirkungsweise von KKS-Anlagen speziell für den unterirdischen Rohrleitungsbau und für Bauwerke des Wasserbaus. Die Arbeiten beschäftigten sich mit der Korrosionsschutzwirkung durch Kompensation der Korrosionsströme zur Erzeugung eines Elektronenüberschusses auf der zu schützenden Metalloberfläche, sowohl mittels galvanischem Schutz mit so genannten Opferanoden als auch dem Schutz mit Fremdstrom.

Nachfolgend noch einige Daten über die Entwicklung des kathodischen Korrosionsschutzes:

- 1905: E. Cumberland schützt in den USA Dampfkessel mit kathodischem Fremdstromschutz gegen Korrosion.
- 1906: F. Haber und L. Goldschmidt kommen zu der Erkenntnis, dass der kathodische Schutz und die Streustromelektrolyse elektrochemische Vorgänge sind. Zur Potentialmessung benutzten sie unpolarisierbare Zinksulfatelektroden.
- 1908: Mc. Collum entwickelt die erste Kupfersulfat-Elektrode.
- 1910: Die von der DVGWA/DE Erdstromkommission erarbeitete VDE 0150 erschien zum Schutz gegen Streuströme.
- 1913: Auf einem Kongress des Institut of Metals in Genf wird der Schutz mit galvanischen Anoden erstmals elektrochemischer Schutz genannt
- 1918: O. Bauer und O. Vogel ermitteln die kathodische Schutzstromdichte für Eisen.
- 1920: Aufgrund von Korrosionsschäden am Rheinlandkabel im Raum Hannover, wurden in Deutschland erstmals Zinkplatten zum kathodischen Schutz des Kabelmantels eingesetzt.
- 1924: H. Guldager verwendet Aluminiumanoden mit elektrischem Gleichstrom zum Innenschutz von Warmwasseranlagen
- 1924: Verhütung von Dampfkesselkorrosion durch kathodischen Schutz von mehreren Lokomotiven in Chicago.
- 1927: Dissertation von W. von Wüllen-Scholten über den Schutz des Eisens durch elektrischen Strom an der TH Dresden
- 1928: R. J. Kuhn wendet den kathodischen Schutz in New Orleans für Gasfernleitungen an und ermittelt das Schutzkriterium von  $-0,85 \text{ V/CuSO}_4$
- 1929: Einbau von Isolierflanschen zum Schutz gegen vagabundierende Ströme im Netz der Ruhrgas AG
- 1939: Aus Russland wird bekannt, dass dort schon über 500 kathodische Schutzanlagen installiert sind. In der Mehrzahl waren dies Anlagen mit galvanischen Anoden.
- 1945: Kathodischer Schutz von Seeschiffen mit Fremdstromanoden in größerem Umfang.
- 1949: W. Ufermann schützt Kühlwasserleitungen der braunschweigschen Braunkohlen-Bergwerke gegen Außenkorrosion mit Zinkanoden
- 1952: Im Saargebiet und in der Pfalz werden erstmals Hochdruck-Ferngasleitungen mit Fremdstromanlagen kathodisch geschützt.



**Abb. 2.5:** Kathodischer Schutzgleichrichter französischer Bauart aus Bogenheim in der Pfalz (1952) [5].

- 1952: R. J. Kuhn installiert die erste Tiefenanode in 90 m Tiefe zum Schutz von Rohrleitungen in New Orleans. In Deutschland wurde die erste Tiefenanode 1962 in Hamburg installiert.
- 1954: Kathodischer Schutz von Landebrücken mit Fremdstrom in den USA
- 1956: Erste Verwendung von platinieren Titananoden in England und Holland für den kathodischen Schutz im Seewasser
- 1959: Kathodischer Innenschutz des Rheindükers bei Düsseldorf
- 1961: Verwendung von Potentiostaten für kathodischen Schutz
- 1961: In der Bundesrepublik sind ca. 5.000 km Rohrleitung kathodisch geschützt
- 1967: Kathodischer Schutz für Hochdruckgasleitungen gefordert (DIN 2470 bzw. G 463).
- 1971: W. v. Baeckmann und W. Schwenk veröffentlichen die erste Auflage „Handbuch des kathodischen Korrosionsschutzes – Theorie und Praxis der elektrischen Korrosionsschutzverfahren“
- 1972: Erste Richtlinie für den kathodischen Schutz von einwandigen erdverlegten Lagerbehälter TRbF 408
- 1974: Vorgeschriebener Schutz von Ferngasleitung mit Drücken über 4 bzw. 16 bar durch KKS-Anlagen, DVGW Arbeitsblatt G 462 und 463, sowie der TRbF 301
- 1981: Veröffentlichung der 1. Auflage „Kathodischer Korrosionsschutz im Wasserbau“ durch den Fachausschuss für Korrosionsfragen der Hafenbautechnischen Gesellschaft e.V. Hamburg

- 1984: Veröffentlichung der DIN 30676, Planung und Anwendung des kathodischen Korrosionsschutzes für den Außenschutz, als Grundnorm für den kathodischen Schutz
- 1985: Vereinheitlichung der Korrosions- und Korrosionsschutzbegriffe durch DIN 30675, 30676, 50900, 50927, 50928 und 50929
- 1989: Veröffentlichung der 2. Auflage „Kathodischer Korrosionsschutz im Wasserbau“ durch den Fachausschuss für Korrosionsfragen der Hafentechnischen Gesellschaft e.V. Hamburg

#### **Literatur:**

- [1] Baeckmann, W. v., Schwenk, W., Prinz, W.: Handbuch des Kathodischen Korrosionsschutzes, 3. Auflage, (1989), 1-25
- [2] Mannesmann AG: ABC der Stahlkorrosion, 2. Auflage, (1966), 176-179
- [3] [http://www.wachsmann-grimm.de/html/geschichte\\_kks.html](http://www.wachsmann-grimm.de/html/geschichte_kks.html)
- [4] Diegel: Die Beständigkeit der gebräuchlichsten Kupferlegierungen im Seewasser, Marine Rundschau, (1898), Heft 11
- [5] <http://www.fkks.de/Archivseite.html>

### **3. Gebräuchliche Begriffe für den Kathodischen Korrosionsschutz (KKS)**

In dieser Übersicht sind in alphabetischer Reihenfolge die Begriffe des KKS erläutert. Die allgemeingültigen Definitionen sind in DIN 50900 Teil 1 und Teil 2 sowie in DIN 50902 festgelegt. Die mit \*) gekennzeichneten Begriffe entstammen anderen vergleichbaren Normen, wie z.B. DIN 30676 (1985) und VG 81249, Teil 1 (1977).

#### **1 Abrasionskorrosion \*)**

Durch die Abrasion wird das Bilden von Deck- und Schutzschichten verhindert oder diese werden so abgetragen, dass der blank bleibende oder blank gewordene Werkstoff einer verstärkten Flächenkorrosion ausgesetzt ist.

#### **2 Aggressivität \*) = Korrosivität**

Aggressivität ist die Eigenschaft eines Korrosionsmediums oder einzelner Bestandteile desselben, bei bestimmten Werkstoffen Korrosion auszulösen oder zu begünstigen. Sie ist immer nur in Verbindung mit einem bestimmten Metall zu verstehen, da sie keine für die Elektrolytlösung spezifische Eigenschaft ist:

Beispiel:

Kalte, schwach bis mittel konzentrierte Salpetersäure ist aggressiv gegenüber Kupfer, nicht jedoch gegen nichtrostende Stähle. Auch Wasser, speziell Seewasser, ist nur in dem Umfang aggressiv, wie es mit bestimmten Metallen unter Bildung, Erhaltung oder Zerstörung von Deckschichten reagiert.

#### **3 Aktiver Zustand**

Zustand einer Werkstoffoberfläche mit nahezu ungehemmter Korrosionsreaktion.

#### **4 Anode**

Bereich eines Korrosionselementes, in dem ein Gleichstrom aus dem Metall in die Elektrolytlösung austritt. In einem Korrosionselement hat die Anode stets das negativere Potential. Es überwiegt die anodische Teilreaktion unter Umwandlung von Anodensubstanz in ein Korrosionsprodukt. In wässrigen Lösungen wird der pH-Wert an der Anode im Allgemeinen vermindert.

#### **5 Anodische Teilreaktion der Korrosion \*)**

Elektrochemische Reaktion, die durch den Übergang positiv geladener Metall-Kationen aus dem Metall in die Elektrolytlösung gekennzeichnet ist. Die Geschwindigkeit dieser Reaktion entspricht der Korrosionsgeschwindigkeit und ist nach dem Faradayschen Gesetz proportional dem anodischen Teilstrom.

#### **6 Anodenspannung**

Anodenspannung ist beim kathodischen Korrosionsschutz die Spannung zwischen Anode und einer Bezugs elektrode im Bereich der Bezugserde.

## **7 Außenkorrosion**

Außenkorrosion ist die an der äußeren, von dem Korrosionsmedium berührten, Oberfläche von Objekten auftretende Korrosion.

## **8 Ausgleichsstrom\*)**

Ausgleichsstrom ist der Gleichstrom, der zwischen zwei Objekten oder zwischen verschiedenen Bereichen eines Schutzobjektes im Elektrolyten (Erdboden) nach Ausschalten des Schutzstromes fließt. Er entsteht durch Potentialunterschiede nach vorausgegangener Polarisierung.

## **9 Ausschaltpotential \*)**

Ausschaltpotential ist das Schutzobjektpotential, das unmittelbar nach dem Ausschalten des kathodischen Schutzstromes gemessen wird.

## **10 Beeinflussung \*)**

Beeinflussung im Sinne dieser Norm ist die Potentialänderung eines Objektes durch Gleichstrom (Streustrom z. B. aus Gleichstrombahnen oder fremden kathodischen Korrosionsschutzanlagen).

## **11 Berührungsspannung**

Berührungsspannung ist nach DIN VDE 0100 Teil 200 der Teil der Fehler- oder Erderspannung, der vom Menschen (oder vom Tier) überbrückt werden kann.

## **12 Belüftungselement**

Ein Belüftungselement entsteht durch unterschiedliche Belüftung der Metalloberfläche. Der weniger belüftete Bereich wird zur Anode, z. B. das Innere von Spalten und der Bereich unter lockeren Belägen. Die besser belüftete Oberfläche, z. B. die mit sauerstoffreichem Wasser angeströmte Fläche, wird zur Kathode.

## **13 Bezugs elektrode**

Die Bezugs elektrode ist eine Elektrode mit einem zeitlich konstanten Potential, z. B. die gesättigte Kalomel- oder Silber/Silberchlorid- oder die Kupfer/Kupfersulfat-Elektrode. Die mit diesen in der Praxis gebräuchlichen Elektroden ermittelten Potentialdifferenzen können bei Kenntnis des Bezugspotentials auf die Standard-Wasserstoff-Elektrode umgerechnet werden.

## **14 Brackwasser \*)**

Brackwasser ist ein Gemisch von Fluss- und Seewasser. Das Brackwasser ist oft mit Mikroorganismen oder mit Verschmutzungen angereichert. Es kann daher trotz der im Vergleich zu Seewasser geringeren Leitfähigkeit verstärkt Korrosionsschäden bewirken.

## **15 Deckschicht**

Unter Deckschicht wird die bei Korrosionsbeanspruchung mehr oder weniger gleichmäßig gebildete Schicht aus festen Reaktionsprodukten verstanden, die die Oberfläche bedeckt. Sie beeinflusst die Korrosionsgeschwindigkeit. Bei nicht gleichmäßiger Bedeckung der Metalloberfläche entstehen Korrosionselemente, die die Korrosion begünstigen. Die Deckschicht wird zur Schutzschicht, wenn sie die Oberfläche gleichmäßig und lückenlos bedeckt und fest haftet.

## **16 Einschaltpotential \*)**

Einschaltpotential ist das Schutzobjektpotential, gemessen bei fließendem Schutzstrom.

## **17 Einspeiseversuch**

Einspeiseversuch ist die Einspeisung eines Gleichstromes in eine Elektrolytlösung (Erdboden) zur Ermittlung des kathodischen Schutzstrombedarfes.

## **18 Elektrische Trennung**

Eine elektrische Trennung liegt vor, wenn Objekte nicht metallisch leitend verbunden sind.

## **19 Freies Korrosionspotential**

Korrosionspotential eines metallischen Bauteils in einer Elektrolytlösung ohne Einwirkung äußerer elektrischer Ströme.

## **20 Fremdkathode \*)**

Fremdkathode ist eine fremde Installation in einer Elektrolytlösung (Erdboden), die ein positiveres freies Korrosionspotential als das betrachtete Objekt (Beispiel: Stahl in Beton) hat und mit diesem ein Korrosionselement bilden kann.

## **21 Fremdstromschutzanlage \*)**

Fremdstromschutzanlage ist die Gesamtheit der für den kathodischen Korrosionsschutz durch Fremdstrom erforderlichen Einrichtungen (Schutzstromgerät, Fremdstromanoden, Kabel).

## **22 Fremdstromanode \*)**

Eine Fremdstromanode ist die Anode einer Fremdstromschutzanlage.

## **23 Galvanische Anode \*)**

Eine galvanische Anode ist eine Anode aus einem unedleren Metall mit negativerem Potential als das des zu schützenden Objektes.

## **24 Galvanisches Element**

Galvanische Verbindung ist eine metallisch leitende Verbindung.

## **25 Gleichrichter**

Gleichrichter ist ein Gerät zur Erzeugung einer Gleichspannung, das als Schutzstromgerät eingesetzt wird.

## **26 Hafenvasser \*)**

Hafenvasser ist durch Schmutz, Öl, Abfälle und Kleinlebewesen verunreinigtes Fluss-, Brack- oder Seewasser im Bereich von Hafen- und Werftanlagen. Hafenvasser kann durch Stagnation und ungenügende Belüftung die Ausbildung von Belüftungselementen begünstigen und zur anaeroben Korrosion führen.

## **27 Anaerobe Korrosion**

Hierunter versteht man Korrosion unter Mitwirkung von Mikroorganismen, die an sauerstofffreien Bereichen unter Sulfatreduktion Korrosion fördern.

## **28 Kathode**

Bereich eines Korrosionselementes, in dem ein Gleichstrom aus der Elektrolytlösung in das Metall eintritt. In einem Korrosionselement hat die Kathode stets das positivere Potential. Es überwiegen kathodische Teilreaktionen, d. h. die Reduktion von Oxidationsmitteln in der Elektrolytlösung. Dadurch wird im Allgemeinen der pH-Wert an der Kathode angehoben. Der Sauerstoffzutritt zur Kathode hat entscheidenden Einfluss auf die Materialabtragung an der Anode.

## **29 Kathodische Teilreaktion der Korrosion \*)**

Elektrochemische Reaktion, die durch den Übergang geladener Elektronen aus dem Metall in die Elektrolytlösung gekennzeichnet ist, wobei sie unmittelbar mit dem im Wasser gelösten Sauerstoff reagieren.

## **30 Kathodischer Korrosionsschutz**

Kathodischer Korrosionsschutz ist ein Schutzverfahren gegen Korrosionsschäden, bei dem der zu schützende metallische Werkstoff zur Kathode gemacht wird. Dies geschieht durch Zuschalten eines elektrochemisch negativeren Metalls hinreichender Aktivität oder von Gleichstrom aus einer Fremdstromanlage. Voraussetzung für die Anwendung von kathodischen Korrosionsschutzverfahren ist die Kenntnis der Potentialabhängigkeit von Korrosionsreaktionen, da bei bestimmten Werkstoffen Grenzpotentiale zu beachten sind.

## **31 Kavitation**

Kavitation ist der mechanische Angriff auf eine Metalloberfläche in schnell strömendem Wasser, beruhend auf dem Zusammenbruch von Wasserdampfblasen, die in der Zone entstehen, in der der Druck des Wassers infolge Überschreitens der kritischen Wassergeschwindigkeit bis zur Wasserdampfbildung herabgesetzt wird. Die heftigen Schläge durch die hammerartig wirkenden Zusammenbrüche der Dampfblasen zerstören nicht nur die Deck- und Schutzschichten auf dem Metall, sondern auch dieses selbst.

### **32 Kavitationskorrosion**

Zusammenwirken von Kavitation und Korrosion, wobei die Korrosion durch Zerstörung von Schutzschichten und durch örtliche Verformung begünstigt wird.

### **33 Kontaktkorrosion**

Kontaktkorrosion ist die Korrosionsart, bei der sich zwei Metalle oder ein Metall und ein Elektronen leitender Festkörper mit unterschiedlichem freiem Korrosionspotential in gleicher Elektrolytlösung befinden und miteinander elektrisch leitend verbunden sind. Die Korrosionsgefährdung steigt mit dem Verhältnis Kathodenfläche zu Anodenfläche und ist besonders groß im Nahbereich von Kathode und Anode.

### **34 Korrosion**

Reaktion eines metallischen Werkstoffes mit seiner Umgebung, die eine messbare Veränderung des Werkstoffes bewirkt und zu einem Schaden führen kann (siehe Abschnitt 5.2). Diese Reaktion ist in Seewasser im Allgemeinen elektrochemischer Art. Korrosion kann auch durch Streuströme aus Gleichstromanlagen entstehen.

### **35 Kupfer/Kupfersulfat-Elektrode**

Eine Kupfer/Kupfersulfat-Elektrode ( $\text{Cu}/\text{CuSO}_4_{\text{ ges.}}$ ) ist eine Bezugselektrode, die aus Kupfer in gesättigter Kupfersulfatlösung besteht. Die Kupfersulfat-Elektrode ist die gebräuchlichste Bezugselektrode für die Potentialmessung im Erdboden.

### **36 Leitfähigkeit, elektrische \*)**

Die elektrische Leitfähigkeit ist der Kehrwert des spezifischen elektrischen Widerstandes.

### **37 Lochfraßpotential**

Kritisches Elektrodenpotential, bei dessen Überschreiten Lochfraß eintritt.

### **38 Lochkorrosion (LK)**

Lochkorrosion ist eine Korrosionsart, bei der die auf der Werkstoffoberfläche sich bildenden anodischen Bereiche um ein Vielfaches kleiner sind als die kathodischen Bereiche. Die Ursache der Lochkorrosion ist häufig die örtliche Verletzung einer schützenden Deckschicht auf Metallen bzw. Durchbruch der Passivschicht an nichtrostenden Stählen z. B. durch Chloridionen. Auswirkung der Lochkorrosion ist der Lochfraß. Es entstehen halbkugel-, kraterförmige oder nadelstichartige Vertiefungen. Außerhalb der Lochkorrosion tritt praktisch keine Flächenabnutzung ein.

### **39 Messstelle/Messpunkt**

Messstelle ist ein metallener leitender Anschluss (Kabel) am Messobjekt/Messpunkt ist der Ort, an dem sich die Bezugselektrode in einer Elektrolytlösung (Erdboden) befindet.

#### **40 Metallene Leitfähigkeit \*)**

Eine metallene Leitfähigkeit ist die auf frei bewegliche Elektronen in Metallen zurückzuführende elektrische Leitfähigkeit.

#### **41 Metallenleitende Verbindung \*)**

Die metallen leitende Verbindung im Sinne dieser Norm ist eine niederohmige, elektrisch leitende Verbindung durch Elektronenleitung.

#### **42 Objektpotential**

Mit Objektpotential bezeichnet man die Gleichspannung zwischen einem metallischen Objekt und der Elektrolytlösung (Erdboden), die mit Hilfe einer Bezugselektrode hochohmig gemessen wird. Das Vorzeichen des Messwertes wird auf die Polarität des Objektes bezogen.

#### **43 Polarisierung \*)**

Unter Polarisierung versteht man die Abweichung vom Freien Korrosionspotential durch Einwirkung eines äußeren Stromes.

#### **44 Potentialabsenkung (-anhebung')**

Potentialabsenkung (-anhebung) ist eine Verschiebung des Potentials in negativer (positiver) Richtung.

#### **45 Passivieren**

Unter Passivieren versteht man die Überführung eines Werkstoffes vom aktiven in den passiven Zustand. Dazu dienen chemische oder elektrochemische Maßnahmen. In lufthaltigem Seewasser werden nichtrostende Stähle von selbst passiv, jedoch mit einer Geschwindigkeit, die vom Sauerstoffgehalt des Wassers und vom Gehalt der Stähle an Cr und Mo abhängt. Ist letzterer nicht ausreichend hoch, tritt Lochkorrosion ein, bevor vollständige Passivierung erreicht ist. In Seewasser ist unlegierter Stahl aktiv.

#### **46 Ruhepotential**

Ruhepotential ist die alte Bezeichnung für Freies Korrosionspotential und nach DIN 50 900 Teil 2 nur noch als Begriff für das Freie Korrosionspotential der homogenen Mischelektrode zulässig.

#### **47 Schutzschicht \*)**

Die Schutzschicht ist eine während des Korrosionsvorganges natürlich, gleichmäßig und dicht aufgewachsene Schicht, die die Korrosionsgeschwindigkeit des Grundwerkstoffes erheblich vermindert oder dessen Korrosion verhindert. Schutzschichten können auch künstlich verstärkt oder erzeugt werden.

#### **48 Schutzpotential-Bereich, Schutzpotential**

Der Schutzpotential-Bereich wird durch kritische Potentiale begrenzt, zum positiven Potential hin durch das Schutzpotential  $U_s$ , und bei einigen Systemen zu negativen Potentialen durch ein Grenzpotential  $U_g$ .

#### **49 Schutzstrombedarf**

Schutzstrombedarf ist der Mindestwert des Schutzstromes, der zum Erreichen des Schutzpotentials erforderlich ist.

#### **50 Schutzstromdichte (mittlere)**

Die mittlere Schutzstromdichte ist der Quotient aus dem Schutzstrom und der von der Elektrolytlösung (Erdboden) umgebenen Oberfläche des Objektes.

#### **51 Schutzstromgerät**

Ein Schutzstromgerät ist ein Gerät zur Erzeugung des für den kathodischen Korrosionsschutz erforderlichen Schutzstromes.

#### **52 Silber/Silberchlorid-Elektrode**

Die Silber/Silberchlorid-Elektrode ist eine Bezugselektrode, die aus Silber mit einem festen Silberchloridüberzug besteht und die direkt oder über eine Elektrolytbrücke in das Medium eintaucht. Die unterschiedlichen Potentiale sind zu beachten. Die Silber/Silberchlorid-Elektrode ist die in Salzwasser gebräuchliche Bezugselektrode:

#### **53 Spaltkorrosion (SK)**

Die Spaltkorrosion ist eine örtliche verstärkte Korrosion in Spalten. Sie ist auf Korrosionselemente zurückzuführen, die durch Konzentrationsunterschiede im angreifenden Mittel, insbesondere durch Sauerstoffmangel und durch pH-Absenkung innerhalb des Spaltes verursacht werden (siehe Abschnitt 2.8). Dabei ist es gleichgültig, ob der Spalt zwischen Metallen oder einem Metall und einem Nichtmetall, z. B. einer Dichtung, liegt. Bei nichtrostenden Stählen wird die Lochfraßbeständigkeit an Spalten, die durch Beläge mit nichtleitenden Feststoffen gebildet werden, wesentlich vermindert. Die Lochkorrosion erfolgt dann, modifiziert durch die Spaltgeometrie, mehr flächenhaft. Passivierbare Stähle dürfen deshalb nur beschichtet werden, wenn gleichzeitig kathodischer Schutz angewendet wird.

#### **54 Spannungsfall**

Spannungsfall (Spannungsabfall) ist die Potentialdifferenz zwischen zwei Punkten eines elektrischen Leiters (z. B. Rohrleitung, Erdboden), der durch einen Stromfluss verursacht wird.

#### **55 Spezifischer Bodenwiderstand**

Spezifischer Bodenwiderstand (Erdwiderstand) ist der spezifische elektrische Widerstand des Erdbodens unter der Annahme, dass der Erdboden sich wie eine homogene Elektrolytlösung verhält.

### **56 Streustrom \*)**

Streustrom ist der unbeabsichtigt aus stromführenden Leitern elektrischer Anlagen in die Elektrolytlösung (Erdboden) übertretende Strom.

### **57 Sulfat reduzierende Bakterien**

Sulfat reduzierende Bakterien (SRB) sind anaerobe Bakterien, deren Reaktionsprodukte auf Metalle korrosiv, im Sinne einer Mikrobiell Induzierten Korrosion (MIC), wirken können.

### **58 Streuströme**

Streuströme wurden früher auch als Irrströme oder vagabundierende Ströme bezeichnet. Es handelt sich um elektrische Gleichströme, die unbeabsichtigt aus elektrischen Anlagen oder elektrischen Leitern (z. B. Gleichstrombahnen, Schweißaggregaten, Krananlagen, kathodische Korrosionsschutzanlagen usw.) austreten und durch das Wasser bzw. das Erdreich fließen.

### **59 Sulfidisierung \*)**

Die Sulfidisierung besteht in der Umsetzung des Metalls mit den in der Elektrolytlösung gelösten Sulfiden oder organischen Schwefelverbindungen zu einem Metallsulfid, das sich meist als spröde, abplatzende Deckschicht oder an den Korngrenzen abscheidet und dann durch Lokalelementbildung die Korrosion begünstigt.

#### 4. Richtlinien, Normen und Standards

ZTV-W, LB 220 Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen - Wasserbau für Kathodischen Korrosionsschutz im Stahlwasserbau

ZTV-W, LB 218 Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen – Wasserbau für Korrosionsschutz im Stahlwasserbau

Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches, Planung und Errichtung Kathodischer Korrosionsschutzanlagen für erdverlegte Lagerbehälter und Stahlrohrleitungen, Arbeitsblatt 12

VG 81259 Kathodischer Korrosionsschutz von Schiffen; Außenschutz durch Fremdstrom

Merkblatt Kathodischer Korrosionsschutz im Stahlwasserbau (MKKS); Karlsruhe 2007

DIN EN 60529; Schutzarten durch Gehäuse (IP Code)  
VDE 0470-1

DIN 18382 VOB Verdingungsordnung für Bauleistungen - Teil C: Allgemeine Technische Vertragsbedingungen für Bauleistungen (ATV) - Nieder- und Mittelspannungsanlagen mit Nennspannungen bis 36 kV

DIN 18382-2 VOB Verdingungsordnung für Bauleistungen - Teil C: Allgemeine Technische Vertragsbedingungen für Bauleistungen (ATV); Elektrische Kabel- und Leitungsanlagen in Gebäuden; (Dokument zurückgezogen)

DIN 19704-3 Stahlwasserbauten; Elektrische Ausrüstung

DIN 30676 Planung und Anwendung des kathodischen Korrosionsschutzes für den Außenschutz; Messen, Steuern, Regeln; Elektrische Messgeräte; (Dokument zurückgezogen)

DIN EN 12954 Kathodischer Korrosionsschutz von metallischen Anlagen in Böden und Wässern

DIN EN 61010-1 Sicherheitsbestimmungen für elektrische Mess-, Steuer-, Regel und Laborgeräte - Teil 1: Allgemeine Anforderungen (Ersatz für DIN 43781-1, 2)  
VDE 0411-1

DIN EN ISO 8044 Korrosion von Metallen und Legierungen, Grundbegriffe und Definitionen (Ersatz für DIN 50900-1, 2, 3)

DIN 50918 Korrosion der Metalle; Elektrochemische Korrosionsuntersuchungen

DIN 50927 Planung und Anwendung des elektrochemischen Korrosionsschutzes für die Innenflächen von Apparaten, Behältern und Rohren (Innenschutz)

DIN 50928 Korrosion der Metalle; Prüfung und Beurteilung des Korrosionsschutzes beschichteter metallischer Werkstoffe bei einer Korrosionsbelastung durch wässrige Korrosionsmedien (im Entwurf)

DIN EN 60079-0 VDE 0170-1	Elektrische Betriebsmittel für gasexplosionsgefährdete Bereiche; Teil 0: Allgemeine Anforderungen
DIN EN 50126; VDE 0150	Schutz gegen Korrosion durch Streuströme aus Gleichstromanlagen
DIN EN 60204 -1 VDE 0113-1	Sicherheit von Maschinen - Elektrische Ausrüstung von Maschinen - Teil 1: - Allgemeine Anforderungen, Deutsche Fassung EN 60204-1
DIN VDE 0100-729	Errichten von Starkstromanlagen mit Nennspannungen bis 1000 V; Aufstellen und Anschließen von Schaltanlagen und Verteilern
DIN EN 60664- VDE 0110-1	Isolationskoordination für elektrische Betriebsmittel in Niederspannungs- anlagen – Teil 1: Grundsätze, Anforderungen und Prüfungen
DIN EN 60079-14 VDE 0165-1	Explosionsfähige Atmosphäre - Teil 14: Projektierung, Auswahl und Errichtung elektrischer Anlagen
DIN VDE 0185-1	Blitzschutzanlage; Allgemeines für das Errichten (Dokument zurückgezogen)
DIN VDE 0556	Bestimmungen für Vielkristallhalbleiter-Gleichrichter (Dokument zurückgezogen)
DIN VDE 0558-1	Halbleiter-Stromrichter; Allgemeine Bedingungen und besondere Bestimmungen für netzgeführte Stromrichter
DIN EN 61008-1 VDE 0664-10	Fehlerstrom-/Differenzstrom-Schutzschalter ohne eingebauten Überstromschutz (RCCBs) für Hausinstallationen und für ähnliche Anwendungen - Teil 1: Allgemeine Anforderungen
DIN VDE 0675-3	Überspannungsschutzgeräte; Schutzfunkenstrecken
DIN 81249-1	Korrosion von Metallen im Seewasser und Seeatmosphäre, Teil 1: Grundlagen
DIN 81249-2	Korrosion von Metallen im Seewasser und Seeatmosphäre, Teil 2: Freie Korrosion in Seewasser
VG 81259-1	Kathodischer Korrosionsschutz von Schiffen; Außenschutz durch Fremdstrom; Begriffe, Berechnungsgrundlagen, Anordnung, Anforderungen an die Beschichtung
VG 81259-2	Kathodischer Korrosionsschutz von Schiffen; Außenschutz durch Fremdstrom; Elektrische Anlagen, Überwachung
VG 81259-3	Kathodischer Korrosionsschutz von Schiffen; Außenschutz durch Fremdstrom; Anoden, Schutzschild, Elektroden, Messtechnik
VGB 4	Elektrische Anlagen und Betriebsmittel

- DVGW GW 10 Inbetriebnahme und Überwachung des kathodischen Korrosionsschutzes erdverlegter Lagerbehälter und Stahlrohrleitungen
- DVGW-GW 12 Planung und Errichtung kathodischer Korrosionsschutzanlagen für erdverlegte Lagerbehälter und Stahlrohrleitungen
- VDE Schriftenreihe 35 Potentialausgleich, Fundamenterder, Korrosionsgefährdung
- AfK Empfehlung Nr. 2 Beeinflussung von unterirdischen metallischen Anlagen durch kathodisch geschützte Rohrleitungen, Kabel und Behälter
- AfK Empfehlung Nr. 6 Errichtung von Fremdstromanlagen für den kathodischen Korrosionsschutz, Schutz gegen gefährliche Körperströme
- AfK Empfehlung Nr. 9 Lokaler kathodischer Korrosionsschutz von unterirdischen Anlagen in Verbindung mit Stahlbetonfundamenten
- v. Baeckmann, W.; Handbuch des kathodischen Korrosionsschutzes  
Schwenk, W.; 3. Auflage, 1989  
Prinz, W. Verlag VCH Verlagsgesellschaft mbH,
- v. Baeckmann, W. Taschenbuch für den kathodischen Korrosionsschutz, Vulkan Verlag Essen, 6. Auflage 1996
- HTG Empfehlung Kathodischer Korrosionsschutz im Wasserbau; 1989,
- Baumann, M.: Aktiver Korrosionsschutz von Stahlwasserbauten, Stahlbau Kalender 2006, S. 755 - 770
- von Baekmann, W.: Taschenbuch für den Kathodischen Korrosionsschutz, Vulkan Verlag Essen
- v. Baeckmann, W., Schwenk, W.: Handbuch des Kathodischen Korrosionsschutzes, 2. Aufl., Verlag Chemie, 1980
- Hoppmann, G.: Kathodischer Korrosionsschutz einer Tankerlöschbrücke, 3 R international, Heft 6/1977
- Baumann, M.: Kathodischer Korrosionsschutz im Stahlwasserbau; in: „Korrosionsschutz durch Beschichtung und Überzüge auf Metallen“, Kapitel 12/3.7, 1-30, WEKA Verlag, Augsburg (1998)
- Kammer der Technik, Konzeption zur umfassenden Verbesserung des KKS in der DDR, Leipzig, 1988 FA Elektrochem. KS, DDR wirtschaftlicher Standpunkt des FA EKS zur Ökonomie des elektrochemischen (kathodischen) Korrosionsschutzes (KKS)ZTV-W
- Rust, H.: Seit 1972 Kathodischer Korrosionsschutz in Stade-Bützfleth; Hansa 15/16 (1985) 1583-1587
- Uhlendorf, H.-J. & Martin, H.: 25 Jahre Kathodischer Korrosionsschutz im Hafen Stade-Bützfleth; Jahrbuch der Hafenbautechnischen Gesellschaft e.V., Bd. 51 (1997) 107-111

## 5. Grundlagen der elektrochemischen Korrosion

Gemäß DIN 50 900, Teil 2, wird die elektrochemische Korrosion wie folgt definiert:

Korrosion, bei der elektrochemische Vorgänge stattfinden. Sie laufen ausschließlich in Gegenwart einer ionenleitenden Phase ab. Hierbei muss die Korrosion nicht unmittelbar durch einen elektrolytischen Metallabtrag bewirkt werden, sie kann auch durch Reaktion mit einem elektrolytischen Zwischenprodukt (z.B. atomarer Wasserstoff) erfolgen.

Die elektrochemische Reaktion ist die häufigste Ursache der Korrosion von Metallen. Kennzeichnend ist der Transport von elektrischer Ladung zwischen den beteiligten Phasen - messbar durch den fließenden Strom.

### 5.1 Thermodynamische Betrachtungen zur Stabilität von Eisen

Wird der Werkstoff Stahl, im allgemeinen Baustahl, der Atmosphäre oder dem Wasser ausgesetzt, so wird gleichzeitig seine Stabilität gefährdet. Die Ursache kann auf Basis der Elektrochemie (s. Abschnitt 5.2) aber auch über die Energiebilanz erklärt werden: Der physiko-chemisch stabile Zustand der Materie ist im ungeordneten, energiearmen Zustand (hohe Entropie) zu beschreiben. Die stabile Form des Eisens an der Atmosphäre ist der oxidierte Zustand. Eisen in der Erdkruste liegt als Erz (Oxide, Sulfide, Karbonate, etc.) also in nicht reiner Form vor. Zur Gewinnung von Eisen bzw. Stahl muss im Hochofenprozess dieser Ausgangszustand durch Zufuhr von Energie überwunden werden. Dieser künstlich hohe Energiezustand des metallischen Eisens (hohe Ordnung - geringe Entropie) kann unter den Bedingungen an der Erdoberfläche nicht ohne besondere Maßnahmen (s. Kapitel 6) aufrechterhalten werden. Das Streben nach dem energieärmeren Ausgangszustand leitet den Prozess des Zerfalls ein. Das heißt, dass das Eisen die Energie wieder freigibt, die ihm bei der Verhüttung zugeführt worden ist. In Worten der Thermodynamik ausgedrückt, lässt sich der Vorgang auch als Übergang eines hoch geordneten Systems zum ungeordneten System, also als Maß der maximalen Entropie (Maß für die Unordnung), beschreiben. Derartige Reaktionen laufen nicht in direkter Abfolge ab bzw. sind diese in ihrer Geschwindigkeit von der Kinetik bestimmt. So können z.B. neugebildete Oxidschichten (z.B.  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) auf der Metalloberfläche die Reaktionsgeschwindigkeit wiederum erheblich reduzieren oder sogar zum Stillstand bringen.

### 5.2 Elektrochemische Korrosion

Bei den oben beschriebenen Vorgängen des Anstrebens des energieärmeren Zustandes von Eisen spielen überwiegend elektrochemische Vorgänge an der Oberfläche des Metalls eine Rolle.

Nach DIN 50900, Teil 2 ist die elektrochemische Korrosion auf Vorgänge unter Mitwirkung von Elektrolyten (ionenleitende Medien) beschränkt. Hierbei kann zwischen

- elektrolytischer Korrosion: Metallabtrag durch anodische Metall-Metallionen-Reaktion
- Elektrodenreaktion: Ladungsdurchtritt an der Phasengrenze Elektrode-ionenleitende Phase
- Metall-Metallionen Reaktion: Durchtritt von Metallionen über die Phasengrenze
- Ionenleitender Phase: Kontakt der Metalloberfläche mit dem Ionenleiter als

Korrosionsmedium

unterschieden werden.

Letztlich erfordern korrosive Vorgänge die Beweglichkeit bzw. den Austausch von Ladungsträgern, d.h. konkret von Ionen und Elektronen. Elektronen können dabei im Metall bewegt werden, Ionen in ionenleitenden Phasen. Dies bedeutet gleichzeitig, dass sich das korrodierende Metall in einem Elektrolyten befinden muss.

### 5.2.1 Elektrochemische Teilreaktionen

Aufgrund der einherlaufenden Ladungsverteilungen kommt es zur Herausbildung negativ und positiv geladener Bereiche. Infolgedessen kann man auch anodische und kathodische Teilprozesse unterscheiden. Die entstehenden Teilströme sind u. a. vom Potentialunterschied der beteiligten Phasen (s. Abschnitt 5.2.5) abhängig bzw. proportional.

### 5.2.2 Anodische Teilreaktion

Die oben beschriebene "Triebkraft" von Metallen in den stabileren Ausgangszustand zurückzukehren führt in der Umgebung von Elektrolyten zu Lösungsvorgängen. Die chemische Reaktionsgleichung kann dabei wie folgt beschrieben werden:



Das zunächst elektrisch neutrale Metall (z.B. Eisen) wird in einem Elektrolyten (wässrige Lösung) eine (stoffspezifische) Auflösung erfahren. Dabei entsteht, unter Freisetzung von Elektronen der äußeren Atomhülle, ein positiv geladenes Ion (z.B.  $\text{Fe}^{2+}$ ), auch Kation genannt. Dieses Ion überwindet die Phasengrenze Metall/Elektrolyt und geht im wässrigen Milieu in Lösung. Die Elektronen hingegen verbleiben im Metall wegen dessen hervorragenden Elektronenleitfähigkeit. Dabei wird die Metalloberfläche, aufgrund der Ladung der Elektronen, elektrisch negativ aufgeladen. Mit zunehmend negativer Ladung wird es für neu entstehende Ionen wegen der gleichzeitigen Elektronenanreicherung immer schwieriger zu entweichen, da die sog. Rückhaltekraft (Anziehung von positiv und negativ geladenen Teilchen) der Abwanderung der positiv geladenen Metallionen entgegenwirkt (s. Abb. 5.1). Hierbei wird sich letztlich ein Gleichgewichtszustand einstellen, welcher eine weitere Ionisation, d.h. Auflösung des Metalls, verhindert.

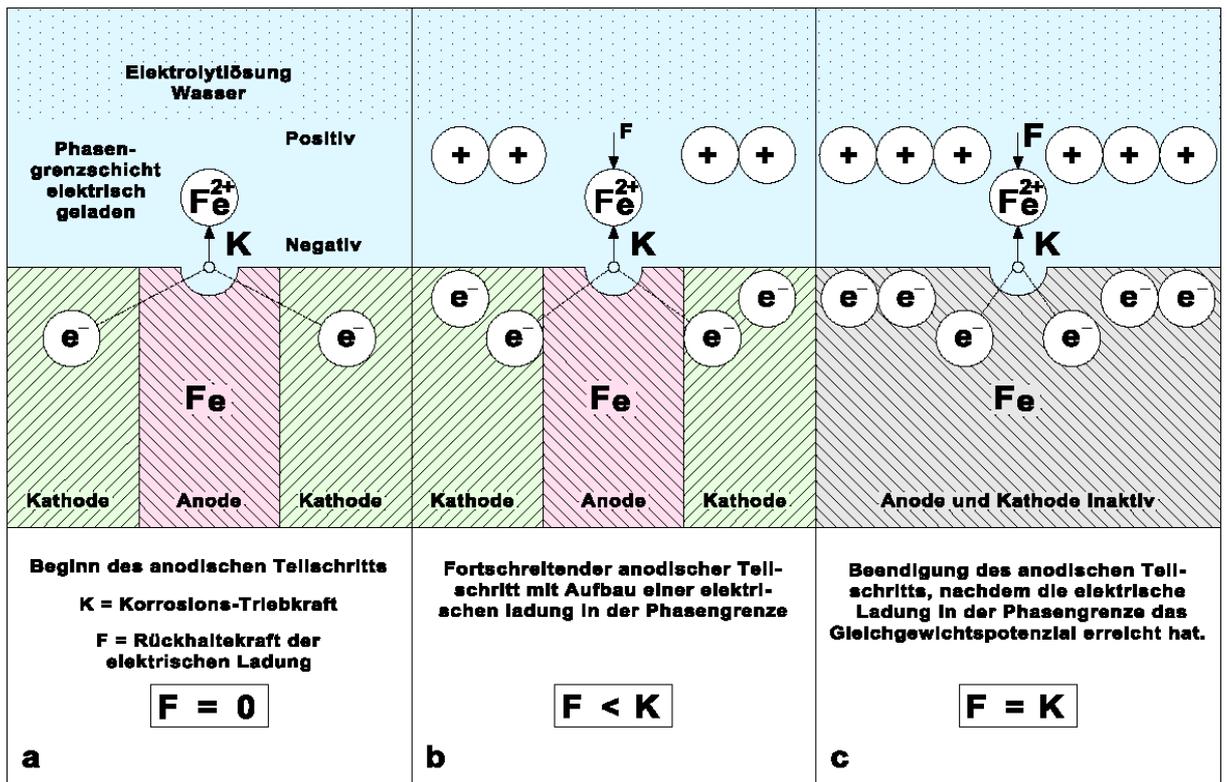


Abb. 5.1: Anodischer Teilschritt

### 5.2.3 Kathodische Teilreaktion

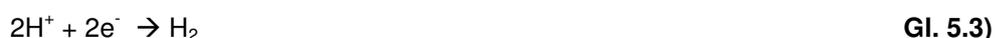
Die Möglichkeit einer kathodischen Reaktion ist dort gegeben, wo sich Elektronen angereichert haben. Da diese Bereiche elektrisch negativ geladen sind, spricht man von Kathoden (ziehen Kationen an).

Diese verbleiben zunächst an der Metalloberfläche, solange ein Elektronenakzeptor oder die äußere Einwirkung elektrischer Ströme fehlt. Stehen an der Metalloberfläche Reaktionspartner zur Verfügung, z.B. Sauerstoff (O<sub>2</sub>) und Wasser (H<sub>2</sub>O), so verläuft im chemisch neutralen Medium die Reaktion nach dem Muster von Gleichung 5.2).



Dabei wird Sauerstoff durch e<sup>-</sup>-Aufnahme, unter Bildung von negativ geladenen Hydroxylionen, reduziert. Bei dieser Reaktion werden Elektronen und Sauerstoff verbraucht; fehlt einer der Reaktionspartner, kommt die Reaktion zum Stillstand. Daneben zeigt die Gleichung 5.2), dass ein Elektrolyt (Wasser) zur Verfügung stehen muss.

Eine weitere kathodische Teilreaktion kann durch Entladung von (positiv geladenen) Wasserstoffionen erfolgen. Dabei werden Wasserstoffionen zu neutralem Wasserstoff reduziert (s. Gl. 5.3)).



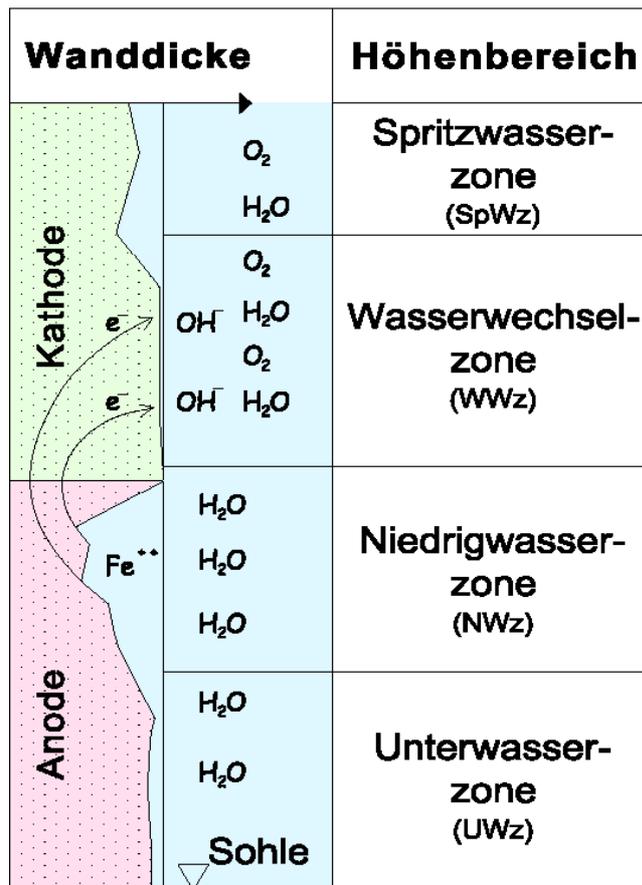
In "normalem", chemisch neutralem Wasser ( $\text{pH} = 7$ ) stehen lediglich  $10^{-7}$  Wasserstoff- ( $\text{H}^+$ ) bzw. Hydroniumionen-Ionen ( $\text{H}_3\text{O}^+$ ) zur Verfügung, d.h. diese Reaktion kommt in natürlichen Gewässern relativ schnell zum Stillstand. In Säuren ( $\text{H}^+$ -Überschuss) ist diese Reaktion allerdings von Bedeutung. Auch hier wird Sauerstoff unter Bildung von Wasser reduziert:



Während Reaktionen gemäß Gl. 5.2) und Gl. 5.4) typische "Sauerstoffkorrosionen" darstellen (abhängig von der Konzentration des zur Verfügung stehenden Sauerstoffs), stellt Gl. 5.3) eine Wasserstoffkorrosion dar.

#### **5.2.4 Korrosionszelle**

Beide oben beschriebenen Teilreaktionen kommen nur dann zur vollen Wirksamkeit, wenn sie in räumlichem Zusammenhang stehen und gleichzeitig ablaufen. Die Ionisation (Oxidation) von Eisen im Stahl ist nur dann weiter möglich, wenn die Rückhalte­kraft durch die elektrisch negative Ladung an der Stahloberfläche nachlässt. Dies geschieht z.B. durch den Abzug von Elektronen. Dies wird wiederum durch den kathodischen Prozess des Elektronenverbrauchs unter Hydroxylbildung bewerk­stelligt. Das heißt umgekehrt, dass eine Eisenauf­lösung auch kathodisch gesteuert sein kann, indem an einer großen Kathode viele Elektronen verbraucht werden. Bildlich kann dieser Vorgang so verstanden werden, dass frei werdende Elektronen von der Anode "abgesaugt" werden, mit der Folge, dass der anodische Prozess der Eisenauf­lösung beschleunigt wird (s. Abb. 5.2).

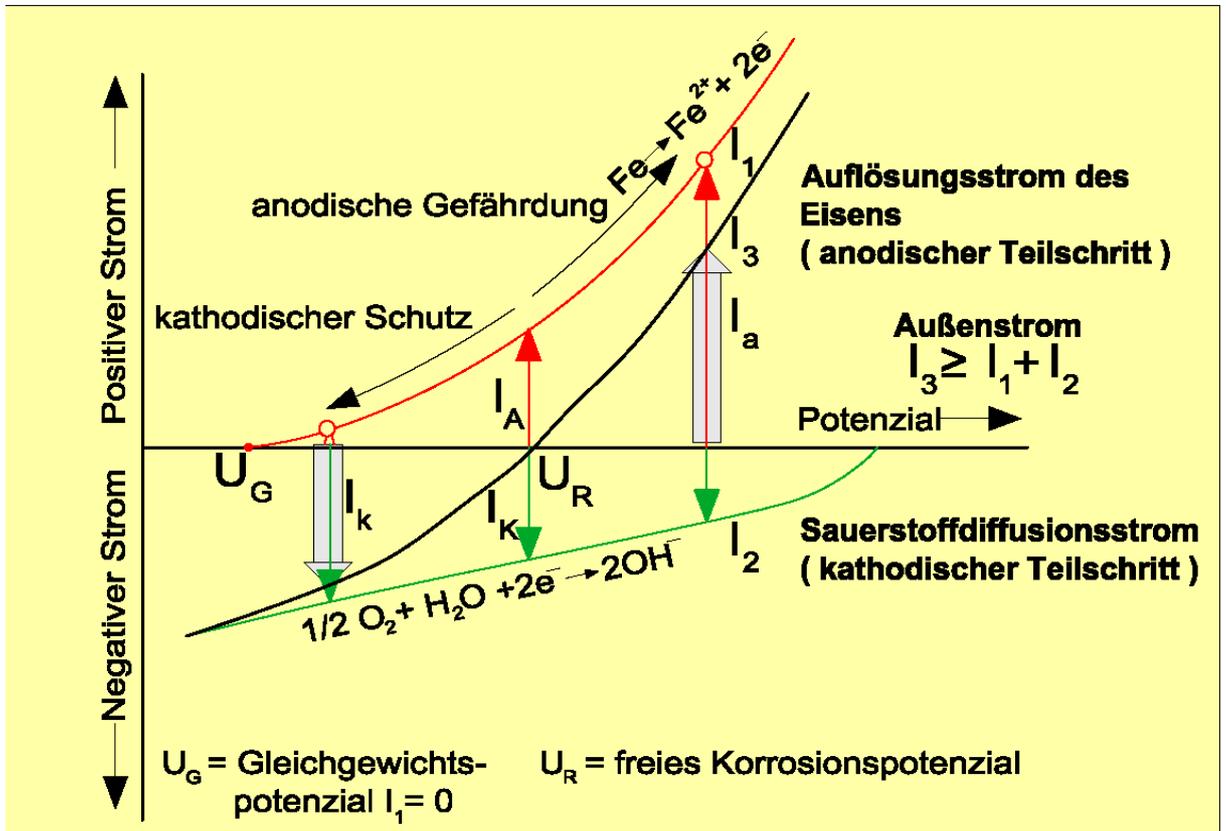


**Abb. 5.2:** Korrosionszelle am Beispiel eines eingetauchten Stahlteiles

### 5.2.5 Elektroden

Elektroden können als Anode (Metallauflösung) oder als Kathode (Ort der Abscheidung von Metallen/Stoffen) ausgebildet sein. Diese Vorgänge können als Teilkurven in Strom-Spannungskurven dargestellt werden. Der anodische Teilstrom ist durch die Menge des aufgelösten Metalls charakterisiert und kann mit dem Faradayschen Gesetz (s. Abschnitt 5.3.4) berechnet werden. Die kathodische Teilkurve kann über die Menge des entwickelten Wasserstoffes oder Hydroxylionen (Sauerstoffreduktion) berechnet werden. Der Übergang vom kathodischen zum anodischen Bereich liegt auf der Abszisse ( $U$ ) ohne messbare Stromdichte ( $i=0$ ). Die Schnittpunkte werden als Gleichgewichtspotentiale ( $U_A$  bzw.  $U_K$ ) bezeichnet. In der Summe ergeben beide Teilkurven eine Stromdichte-Potential-Kurve (Abb. 5.3). Zwischen den Gleichgewichtspotentialen der Teilreaktionen liegt das freie Korrosionspotential ( $U_R$ ; synonym für Ruhepotential). Da beide Teilprozesse an einer Elektrode (korrodierender Werkstoff) ablaufen, spricht man auch von einer (homogenen) Mischelektrode. Mit dem Austreten von Metallionen entsteht an der Anode ein Auflösungsstrom der Stromdichte  $i_1$ . Dieser ist wiederum abhängig vom Verbrauch an Elektronen an der Kathode, womit der Sauerstoffdiffusionsstrom ( $i_2$ ) beschrieben ist. Aus beiden Teilkurven kann eine Summenkurve erstellt werden.

Ohne Einwirkung eines äußeren Stromes wird im Gleichgewichtspotentialpunkt gleichzeitig das Korrosions- bzw. Mischpotential eines Werkstoffes erkennbar. Der Betrag der Verschiebung der Kurve entlang der Abszisse, z.B. durch äußeren Strom, entspricht der Überspannung, welcher gleichzeitig dem Polarisationspotential entspricht.



**Abb. 5.3:** Stromdichte-Potential-Kurven der beiden Teilreaktionen (qualitativ)  
(Homogene Mischelektrode)

Die Steigung der Summenkurve beim Durchtritt durch die Abszisse (Gleichgewichtspotential) ist ein Maß für die Polarisierbarkeit und zugleich ein reziprokes Maß für die Korrodierbarkeit: Eine große Steigung ( $\Delta U/\Delta i$ ) zeigt z.B. eine kleine Polarisation mit großer Korrosion an.

Indem sich homogene Mischelektroden dadurch auszeichnen, dass Anode und Kathode sich ständig verschieben bzw. wechseln, führt dies zu einem (gleichmäßigen) Flächenabtrag. Bei heterogenen Mischelektroden hingegen sind Anode und Kathode räumlich festgelegt. Üblicherweise stark ausgeprägt ist dies bei Kombination unterschiedlich edler Metalle. In der Summenstrom-Potential-Kurve zeigt sich dies durch die Verschiebung des Korrosionsmischpotentials ( $U_{kk}$ ). Eine derartige Kontaktkorrosion auf Basis eines Galvanischen Elements führt im anodischen Bereich zur Lochfraßkorrosion.

### 5.3 Einflussgrößen für den Ablauf der Korrosion

Die Korrosionserscheinung und das Maß des korrosiven Abtrages an einer Elektrode hängt von verschiedenen Randbedingungen ab. Die Hauptursachen liegen zunächst im Elektrodenmaterial selbst, wie auch in dem umgebenden Elektrolyten begründet.

#### 5.3.1 Passivierung

Unter Passivität versteht man einen Zustand der Metalloberfläche, bei dem die Auflösungsgeschwindigkeit trotz erheblich positiver elektrochemischer Affinität ( $\Delta G < 0$ ) sehr gering ist. Sie wird durch Passivschichten bewirkt und ist u.a. an Potentialbereiche gebunden.

Insgesamt betrachtet wirkt also eine Passivschicht dem zu erwartenden korrosiven Abtrag an einem Metall (Elektrode) entgegen. In der Stromdichte-Potential-Kurve zeigt sich dieser Umstand durch das plötzliche Absinken der Stromdichte trotz weiteren Potentialanstiegs. Die Passivierung kann als Konkurrenzreaktion zur (aktiven) anodischen Auflösungsreaktion verstanden werden (Gl. 5.5). Die Passivierung des Metalls geschieht durch die Entstehung dünner, festhaftender Oxid- bzw. Salzsichten, welche das Metall porenfrei bedecken. Die oftmals gewünschte spontane Passivierung kann z.B. durch gezieltes Legieren von Metallen hervorgerufen werden. Damit ist kein Durchtritt von Metallionen in den Elektrolyten mehr möglich. Die Passivierungsschichten sind sowohl ionen- wie auch elektronenleitend ausgebildet. Die Wirkung der Passivierung beginnt bereits bei monomolekularer Bedeckung durch (meist) oxidische Filme bzw. Schichten.



Dabei bilden sich, je nach Metall und Wertigkeit der Oxidation unterschiedlich dichte Filme (z.B.  $\text{Al}_2\text{O}_3 > \text{Fe}_2\text{O}_3$ ), mit entsprechend unterschiedlicher Schutzwirkung aus. Die Passivierungsschichten haben gewöhnlich einen begrenzten Stabilitätsbereich. Mit weiterer Zunahme der Spannung tritt wieder ein Anstieg der Stromdichte ein. In Nähe der Durchbruchspannung kommt es daher zur transpassiven Auflösung. Passivierungsschichten sind auch häufig gegen chemische Einflüsse (spezifische Anionen, pH-Wert-Änderungen) äußerst labil. Bekanntestes Beispiel ist der Zusammenbruch der  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  Passivierungsschicht (Magnetit) am Bewehrungsstahl bei der pH-Wert-Absenkung im Beton.

#### 5.3.2 Elektrochemische Spannungsreihe

Den Vorgang der elektrochemischen Korrosion hat W. Nernst mit der Wechselbeziehung des Lösungsdrucks des eingetauchten Metalls und dem osmotischen Druck des Elektrolyten erklärt. Ist der Lösungsdruck des Metalls größer als der konkurrierende osmotische Druck löst sich das Metall; andernfalls kommt es zur Metallabscheidung. Damit ergibt sich ein Zusammenhang von Elektrode (Metall) und Elektrolyt (ionenleitende Phase), der sich in einer Potentialdifferenz äußert. Die absolute Messung des Elektrodenpotentials ist nicht möglich. Die Messung erfolgt daher mit zwei Halbzellen

(jew. Elektrode/Elektrolyt), wobei eine die Bezugs elektrode, die andere das Korrosionselement darstellt. Als Bezugs elektrode wird häufig die Standardwasserstoffelektrode (SWE) eingesetzt. Weitere oftmals genutzte Halbzellen sind die Cu/CuSO<sub>4</sub> -, Ag/AgCl - und Kalomel(Hg) - Elektroden, wobei bei der Interpretation von Potentialmesswerten die Verschiebung der Potentiale je nach Bezugs elektrode zu berücksichtigen ist.

Elektrochemische Spannungsreihen werden vor allem für reine Metalle erstellt. Die Stellung eines Elements bzw. Metalls in der Spannungsreihe gibt Auskunft darüber, wie ihre relative Stabilität jeweils zueinander liegt. Bei der Erstellung von (theoretischen) elektrochemischen Spannungsreihen sind folgende Einschränkungen für die praktische Anwendbarkeit zu berücksichtigen. Zunächst wurden diese für reine Metalle in bestimmten Elektrolytlösungen erstellt. Zudem bilden Metalle/Legierungen häufig Oxidschichten, welche passivierend wirken und eine Verschiebung in Richtung positiveren Potentials zur Folge haben. Deshalb haben Elze & Oelsner [1] eine praktische Spannungsreihe aufgestellt. In Tabelle 5.1 sind die Potentialwerte von metallischen Werkstoffen mit zwei unterschiedlichen Elektrolyten aufgelistet.

Metall	Phtalatpuffer (pH=6)	Meerwasser
Titan	(+ 181)	(- 111)
Messing Ms 63	+ 145	+ 130
Kupfer	+ 140	+ 100
Nickel 99,6	+ 118	+ 460
Aluminium 99,5	(-169)	- 667
Hartchromüberzug auf Stahl	(- 249)	- 291
Grauguss GG 22	- 346	- 347
Baustahl St 37 (S235JR)	- 350	- 335
Stahlguss 1,26 M% C	- 377	
Zink 98,5	- 823	- 284

25 ° C, luftgesättigt; ( ) = Tendenz zu positiveren Werten

**Tabelle 5.1:** Praktische Spannungsreihe (Ruhepotentiale) gegen SWE [mV]

Je positiver der Potentialwert, desto geringer der korrosive Abtrag im Elektrolyten. Aus den Werten ist klar zu erkennen, dass die Potentiale im Meerwasser negativere Werte annehmen (Ausnahme: Zn 98,5). Gleichzeitig zeigen die Werte, dass die Ruhepotentiale der praktischen Spannungsreihe von denen der reinen Metalle der elektrochemischen Spannungsreihen oftmals deutlich abweichen (vergleiche reines Eisen (-440 mV) mit Stahl (-350 mV) bzw. reines Al (-1660 mV) zu Al 99,5 (-169 mV) in jew. chemisch neutralem Medium).

Bei Werkstoffpaarungen können die aufgelisteten Werte über die Gefahr einer Kontaktkorrosion informieren (s. Tab. 5.2). Dabei ist zu bedenken, dass es in seltenen Fällen zur Potentialumkehr kommen kann. Z.B. wird das Ruhepotential von Zink in neutralem Medium bei ca. 63°C auf über -440 mV angehoben, womit Zink z.B. edler als Stahl wird. Dies ist vor allem bei feuerverzinkten Stahlrohren für Warmwasserleitungen zu beachten. Weitere Veränderungen treten z.B. bei Deckschichtenbildung ein (siehe Aluminium).

### **5.3.3 Einfluss des Elektrolyten**

Das Immersionsmedium (Elektrolyt) beeinflusst das Korrosionsverhalten von Stahl auf vielfältigste Weise. Zunächst wirken darin vorkommende Anionen (Chlorid, Sulfat) direkt korrosiv, indem sie die Rostschicht angreifen bzw. Eisen in leicht lösliche Verbindungen überführen. Mit Zunahme der elektrischen Leitfähigkeit aufgrund des Ionengehaltes der wässrigen Lösung nimmt auch die Leitfähigkeit zu bzw. der elektrische Widerstand ab. Damit ist ein höherer Stromfluss zwischen Kathode und Anode und somit ein erhöhter Abtrag an der Anode möglich. Maßgeblich ist selbstverständlich auch der Sauerstoffgehalt des Elektrolyten. Bei zonierten O<sub>2</sub>-Konzentrationen treten Belüftungselemente auf (s. Abschnitt 5.4). Erhöhte Gehalte an Alkalien tragen zur Schutzschichtbildung am Stahl und zur Erhöhung des pH-Wertes und der Säurekapazität und somit insgesamt zur höheren Stabilität des Stahlbauteiles bei. Daneben sind noch Gewässertyp (fließend, stehend etc.) bzw. Erdreich, Lage des Bauteils (eingetaucht, Wechselzone) und elektrochemische Einflüsse der Umgebung (s. Fremdkathoden) von Bedeutung.

Eine Möglichkeit der vorhersagenden Berechnung für Immersionsmedien bietet die DIN 50929 für Erdböden bzw. Wässer an. Aufgrund von Algorithmen kann Flächen- und Lochfraßpotential für Stahl- und feuerverzinkte Oberflächen abgeschätzt werden.

### **5.3.4 Abtrag gemäß Faraday'schem Gesetz**

Sind zwei Metalle mit unterschiedlichem Ruhepotential unmittelbar (metallen leitend) und durch einen Elektrolyten verbunden, so fließt gemäß dem Ohm'schen Gesetz ( $U \sim I \cdot R$ ) ein Strom zwischen beiden Metallen. Der Metallabtrag bzw. Massenverlust ( $m$ ) des unedleren Materials (Anode) ist nach Faraday der Elektrizitätsmenge proportional ( $m \sim Q \sim I \cdot t$ ). Durch Formelumstellung gelangt man zur folgenden Gleichung, die eine Quantifizierung des Abtrages ermöglicht:

$$m = M \cdot I \cdot t / (z \cdot F)$$

**Gl. 5.6)**

$m$  = Masse des abgeschieden Stoffes [g]

$M$  = molare Masse des Stoffes [g/mol] (hier Eisen: 55,8 g/mol)

$I$  = Stromstärke [A]

$t$  = Zeit bzw. Dauer der Einwirkung [s]

$z$  = Wertigkeit (Ladung) des entladenen Ions ( $n = 1$  bis  $5$ , Eisen:  $3$ )

$F$  = Faraday-Konstante [96 485 As/mol]

Bei Kombination von Baustahl (Ruhepotential: - 0,4 Volt) mit CrNi-Stahl (Ruhepotential: + 0,1 Volt) tritt aufgrund des Potentialunterschieds eine Spannung auf. Zur Berechnung der Stromstärke werden zum Einsetzen in die Formel des Ohmschen Gesetzes noch die Widerstandswerte benötigt. Die Teilwiderstände der Anode ( $R_a$ ) und Kathode ( $R_k$ ) werden zunächst einmal vernachlässigt, so dass nur der spezifische Widerstand des Elektrolyten ( $R_e$ ; Flusswasser mit einer Leitfähigkeit von 1,5 [mS/cm] = 667 [ $\Omega \times \text{cm}$ ]) berücksichtigt wird. Die Geometrie findet insofern Berücksichtigung, als zwischen Anode und Kathode ein Abstand ( $d$ ) von 10 cm angenommen wird. Dazu gelangt man zur spezifischen Stromdichte ( $i_e$ ):

$$i_e = (U_k - U_a) / R_e \cdot d$$

**Gl. 5.7)**

$$= 0,5 \text{ V} / 667 \text{ } \Omega \cdot \text{cm} \cdot 10 \text{ cm}$$

$$= 0,000 \text{ 075 [A/cm}^2\text{]}$$

Die Massenverlustberechnung an der Anode (Baustahl;  $m_a$ ) nach einer Zeit von einem Jahr ( $365 \cdot 24 \cdot 3600$  s) lässt sich nun durch Einsetzen in Gl. 5.6) durchführen (vergleiche [2]):

$$m_a = M \cdot i_e \cdot t (z \cdot F)$$

$$= 55,8 \cdot 0,000 \text{ 075} \cdot 31 \text{ 536 000} / (3 \cdot 96 \text{ 485}) = 4,5 \text{ g/cm}^2 \text{ Eisen}$$

Für Meerwasser mit einer Leitfähigkeit von 37 mS/cm (= 27  $\Omega \cdot \text{cm}$ ) berechnet sich ein Abtrag von entsprechend 112 g/cm<sup>2</sup> Eisen.

Diese kalkulierten Werte sind (theoretische) maximale Abtragungswerte, da der sich durch Korrosionsschichten aufbauende Polarisationswiderstand der Anode gleich Null gesetzt wird.

### 5.3.5 Flächenverhältnis

Die oben berechneten Eisenabträge im "kurzgeschlossenen Kontaktkorrosionselement" gelten bei etwa gleich großen Anoden- und Kathodenflächen. Zur Berücksichtigung der Flächenverhältnisse ist die Flächenregel ( $i$  = Stromdichte,  $a$  = Fläche) anzusetzen:

$$i_{\text{Anode}} \cdot a_{\text{Anode}} = i_{\text{Kathode}} \cdot a_{\text{Kathode}} \quad \text{Gl. 5.8)}$$

Wird die Fläche der Kathode gegenüber jener der Anode (z.B. durch Beschichten) auf 1/10 reduziert, verkleinert sich die Anodenstromdichte und letztlich der Materialabtrag an der Anode auf 1/10.

### 5.3.6 Streuströme

"Streustrom ist der in einem Elektrolyten (Erdboden/Wasser) fließende Strom, soweit er von im Elektrolyten liegenden Leitern stammt und von elektrischen Anlagen geliefert wird" (DIN 57150/VDE 0150 8.75).

Durch (ungewollte) Streuströme können erhebliche Materialmengen an Stahlbauwerken abgetragen werden. Relevant sind dabei nur Gleichströme und meist Stromaustrittsstellen. Als Quellen kommen Kran- und Bahnanlagen, (kathodische) Fremdstrom- und Schweißanlagen in Frage. Tritt z.B. bei Schweißarbeiten ein Schweißstromanteil von 100 Ampere als Streustrom auf, dann werden in 2 1/2 Stunden gemäß dem Faraday'schen Gesetz mehr als 300 g Stahl aufgelöst.

An Stromeintrittsstellen treten andere unerwünschte Begleitumstände in Form von übermäßiger Wasserstoff- und/oder Hydroxylentwicklung auf. Dieser Effekt ist vergleichbar mit einem Überschutz durch KKS-Anlagen.

### 5.3.7 Fremdkathoden

Materialien und Gegenstände, welche elektrolytisch in Kontakt mit dem zu schützenden Bauteil stehen und gleichzeitig in der Spannungsreihe der Elemente darüber stehen, wirken als Fremdkathoden. In Böden können dies z.B. Kohleteilchen (Ruhepotential vergleichbar mit Graphit) oder Kupfererder und dergleichen sein. Bei eingetauchten Bauwerken gilt dies für CrNi-Stähle oder auch für Baustahl (eingebettet in Beton) gegenüber allen freiliegenden Baustahlteilen.

## 5.4 Korrosionsursachen und ihre Erscheinungsformen

Die Korrosion wird im Wesentlichen von physiko-chemischen Reaktionen in Grenzflächenbereichen bestimmt. Die verschiedenen Einflussfaktoren sind in Abschnitt 5.3 erläutert und aufgelistet. Häufig stehen Erscheinungsform und Ursache der Korrosion im Zusammenhang, woraus sich Korrosionstypen ableiten lassen.

### Flächenkorrosion

Die Flächenkorrosion erstreckt sich über große Areale und ist relativ gut in der Vorhersage bestimmbar. Der Abtrag erfolgt flächig und gleichmäßig. Indem Anode und Kathode räumlich eng miteinander verknüpft sind und zudem eine ständige Platzänderung mit sich ziehen, wird die korrodierte Fläche gleichmäßig abgetragen.

### Lokalisierte Korrosion - nicht abtragend (Muldenkorrosion)

Hierbei liegen Anode und Kathode an einer Elektrode, jedoch sind beide mehr (Makroelement) oder weniger weit (Mikroelement) von einander getrennt. Die Ursachen der Entstehung von Lokalelementen können einerseits in der unterschiedlichen Beschaffenheit der vorliegenden Oberflächen liegen. Aufzuzählen sind hierzu

- Verunreinigungen und Oxidation,
- heterogene Legierung (Zementit: elektropositiv, Ferrit: elektronegativ) und
- homogene Legierung mit unterschiedlicher Kristallkorngröße
- Deformationen durch Schweißen und mechanische Bearbeitung.

Andererseits treten Konzentrationsgefälle durch das korrodierende Medium auf, was z.B. zu einem Belüftungselement (sauerstoffreiches Areal wird Kathode) führt.

### Spaltkorrosion

Mit der Entfernung von der Elektrolytoberfläche nimmt der Sauerstoffgehalt an einem Metall ab. Daher ist der relativ O<sub>2</sub>reiche Metallrandbereich prädestiniert, Ort der (kathodischen) Sauerstoffreduktion zu sein. Dementsprechend wird dieser Bereich durch Hydroxyl-Bildung immer alkalischer. Hier kann, entsprechend dem Pourbaix-Diagramm, die Grenze der Passivität erreicht werden, so dass Eisen immun gegen Auflösung wird. Zugleich ist der sauerstoffarme Bereich der benetzten Metalloberfläche Ort der Metallauflösung. In Abb. 5.4 sind Beispiele der Spaltkorrosion an Nieten und Vertiefungen (Spalten) dargestellt. Die Materialien können dabei aus demselben Metall bestehen.

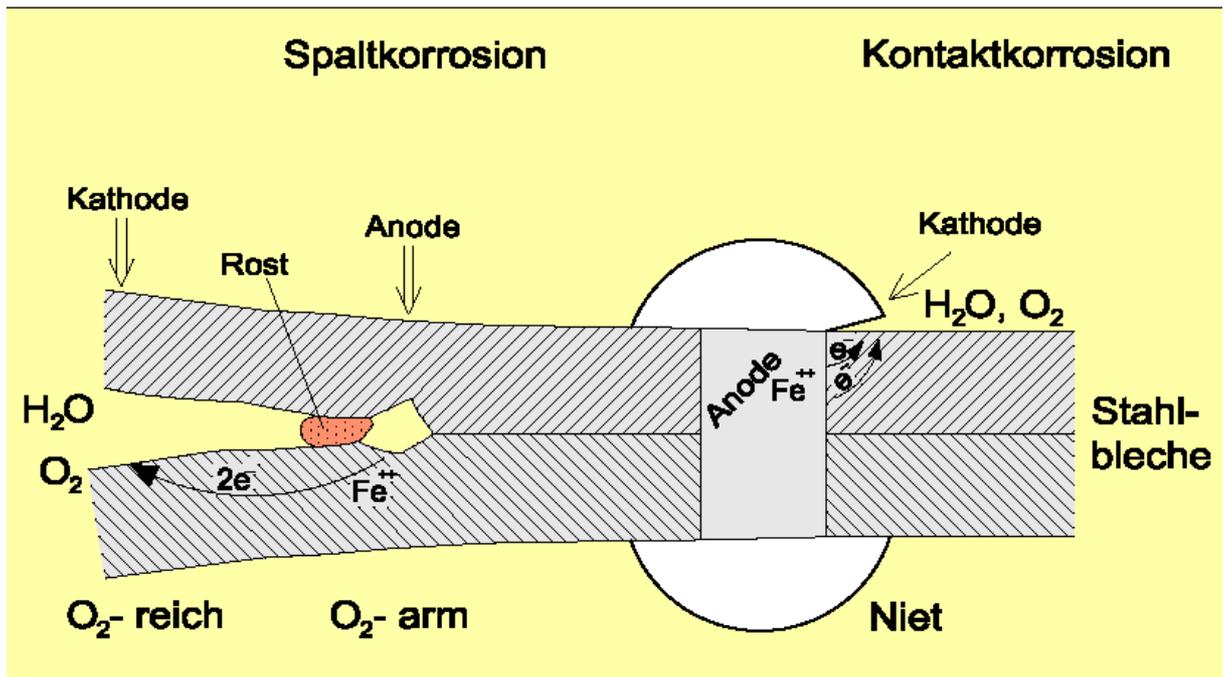


Abb. 5.4: Spaltkorrosion am Spalt und Nietkopf (Bild BAW)

#### Kontaktkorrosion

Werden zwei verschiedene Metalle miteinander kombiniert, z.B. aus konstruktiven Gründen, so stehen diese gewöhnlich in elektrisch leitenden Kontakt zueinander. Der Stromkreis wird durch Eintauchen in einen Elektrolyten geschlossen ("kurzgeschlossenes Kontaktkorrosionselement"). Da zwei Metalle meist auch unterschiedliche Korrosionspotentiale besitzen, ist die Korrosion des unedleren Metalls vorhersehbar (Ausnahme: vorliegende Passivierungsschichten). Eine Erhöhung der (anodischen) Stromdichte stellt sich, entsprechend der Flächenregel, bei großem Verhältnis der Fläche Kathode/Anode ein. Die Stromdichte ist dabei unmittelbar an der Kontaktstelle am größten. In Tabelle 5.2 sind Massenverluste von Metallen im Kontakt mit Eisen in Kochsalzlösung aufgelistet.

Zweites Metall	Korrodiertes Fe [mg]	Korrodiertes zweites Metall [mg]
Magnesium	0,0	3.104,3
Zink	0,4	688,0
Aluminium	9,8	105,9
Blei	183,2	3,6
Nickel	180,0	1,6
Kupfer	183,1	0,0

Tabelle 5.2: Massenverluste von Metallen im Kontakt mit Eisen (in 1%iger NaCl-Lösung) [3]

Vermieden bzw. reduziert werden können die Korrosionserscheinungen durch elektrische Isolierung der beiden Metalle oder durch Kleinhalten der Kathodenfläche unter Beachtung der Flächenregel.

### Filiformkorrosion

Eine Sonderform der Lokalelementkorrosion stellt die Filiform- bzw. Fadenkorrosion dar. Hierbei bilden sich an "Kopf" und "Schwanz" jeweils OH-Bereiche (Kathoden) aus, welche ein Gebiet der Eisenauflösung (Anode) umschließen. Der Kopf ist hygroskopisch und kann mit relativ hoher Geschwindigkeit wandern. Neben Stahl ist vor allem Aluminium (unter Chlorideinfluss) ein häufig von Filiformkorrosion betroffenes Metall.

### Mulden- und Lochkorrosion

Mulden- und Lochkorrosion sind häufig auftretende Korrosionsformen. Im Unterschied zur Muldenkorrosion steht bei der Lochkorrosion eine kleine Anodenfläche einer relativ großen Kathodenfläche gegenüber, mit der Folge eines Anhebens des Anodenstromes und stark konzentrierter Abtragung. Die Durchbruchspannung zeigt hierbei einen starken Anstieg im Strom-Spannungs-Diagramm. Dabei treten krater- und muldenförmige Strukturen auf. Ursache ist meist eine ungleichmäßige Oberfläche, z.B. wenn die elektrochemisch edlere Oxidationsschicht des Metalls Fehlstellen aufweist, wodurch dieses freigelegt wird und als Anode dient. Besonders ausgeprägt ist dies bei legierten Stählen und Aluminium, wobei die Passivierungsschicht, besonders bei Immersionsmedien mit niedrigem Redox-Potential, zusammenbricht.

### Chloridinduzierte Korrosion

Chloridionen können Eisen und Passivierungsschichten, unter Bildung von leichtlöslichen Salzen an Lokalelementen, direkt auflösen. Chloride lagern sich bevorzugt an passivierenden Verbindungen an, durchdringen Oxidfilme und greifen den Stahl direkt an. Zudem tragen neugebildete Eisenchloride durch Hydrolyse zur pH-Wert-Absenkung und somit zu einer selbst tragenden, sich vertiefenden Korrosion bei (Salzsäurebildung gemäß Gl. 5.9). Chloride werden dabei nicht unbedingt verbraucht, sondern stehen, nach Substitution durch Hydroxyl (z.B. Bildung von  $\text{Fe}(\text{OH})_2$ ), für weitere Angriffe wieder zur Verfügung (Gl. 5.10).



### Lokalelemente – abtragend

Erosion, Verschleiß und Abrieb

Mechanischer Abtrag durch schnellströmende Flüssigkeit, die Gasblasen oder feste Teilchen (Abrasion) mit führt. Dadurch wird die Schutzschicht, wie auch das Metall selbst, abgetragen, mit der Folge, dass sich ständig die (erhöhte) Anfangskorrosion einstellt.

## Kavitation

Mechanischer Angriff in schnell strömendem Wasser auf Grund des Zusammenbruchs von Wasserdampfblasen. Diese entstehen durch Überschreiten der kritischen Wassergeschwindigkeit wobei der Wasserdruck bis zur Wasserdampfbildung herabgesetzt wird. Durch das Zusammenbrechen der Dampfblasen entstehen heftige, hammerartige Schläge durch Wassertropfen, welche die Deckschichten und das Metall selbst zerstören.

## Mikrobiell induzierte Korrosion (MIC)

Bakterien können in mehrfacher Hinsicht die Korrosion von Stahl bewirken bzw. beschleunigen. Zunächst gilt dies für die Bakterien der Gattung Acidithiobazillus, welche Schwefelsäure erzeugen (A. Thiooxidans und A. Ferrooxidans) und somit den Stahl direkt angreifen und auflösen. Häufig ist die angreifende Wirkung jedoch lediglich mittelbar, wie z.B. beim Desulfovibrio desulfuricans (Sulfatreduzierende Bakterien, SRB): Stehen Elektronen an einer sich bildenden Kathode zur Verfügung, so werden diese von Wasserstoffionen unter Bildung von Wasserstoffgas verbraucht. Im anaeroben Milieu produzieren SRB in Gegenwart von Sulfat und unter  $H_2$ -Verbrauch Sulfid bzw. Schwefelwasserstoff. Durch diese Reduktion von Sulfat werden Elektronen verbraucht, die dann an der Kathode unter zunehmender Auflösung von Eisen an der Anode umso schneller nachgeliefert werden. Dieser Prozess kommt zum Erliegen, sobald sämtliches Sulfat des Elektrolyten verbraucht ist. Diese Limitierung wird durch die Anwesenheit der Gattung der aeroben Acidithiobazillen überwunden, welche die Schwefelverbindung reoxidieren. Damit steht wiederum Sulfat für das sog. Sulfuretum zur Verfügung [4]. Die Korrosionserscheinungen können wasser-, aber auch bodenseitig auftreten. Voraussetzung ist dabei immer, dass Sulfat und verwertbare Kohlenwasserstoffe (u.a. Mineralöl) zur Verfügung stehen. Die Abtragungsgeschwindigkeiten z.B. an Stahlspundwänden können dadurch dramatisch angehoben werden: 1,5 mm pro Jahr sind keine Ausnahme.

## 5.5 Sonstige Korrosionsmechanismen

### Chemische Korrosion (H<sub>2</sub>-Säure-Korrosion)

Reine Metalle sind in Säuren instabil und werden, ohne elektrochemischen Einfluss, durch Auflösung zersetzt.

### Hochtemperaturkorrosion

Darunter wird eine Oxidation des Metalls durch Gase oder Schmelzen bei sehr hohen Temperaturen verstanden. Es entsteht eine „Zunderschicht“.

### Selektive Korrosion

Spongiose: Im Gussstahl wird Eisen bevorzugt herausgelöst, ein schwammförmiges Gerüst aus Graphit (= Spongiose) bleibt übrig.

Entzinkung: In Messing wird das unedlere Zink (gegenüber dem Legierungspartner Kupfer) herauslöst.

Weitere Formen dieser Korrosionsart sind Entaluminierung, Entnickelung,  $\alpha$ -Ferritkorrosion, Korrosion von Schweißgut bzw. der wärmebeeinflussten Zone.

### Atmosphärische Korrosion

Neben dem Zusammenspiel von Feuchtigkeit und Sauerstoff zum Aufbau eines Korrosionselements spielen hier weitere Einflussfaktoren wie Atmosphäerilien (Chloride, SO<sub>2</sub>), welche als Korrosionsstimulatoren wirken, eine entscheidende Rolle.

### Formen der Risskorrosion

Hierbei wirken neben dem korrosiven Medium noch mechanische Beanspruchungen auf das Bauteil ein. Bei Zugbeanspruchung führt dies zur Risskorrosion in Form eines verformungslosen (interkristallinen/transkristallinen) Bruches. Die Folge davon ist ein Kornzerfall des Metallgefüges, welches einem weiteren (elektrochemischen) Angriff ausgesetzt ist.

Die Spannungsrisskorrosion ist insofern eine Sonderform, als hier neben den mechanischen Spannungen noch aggressive Medien auf das Bauteil einwirken. Der Bruch erfolgt entlang einer Gleitebene und kündigt sich gewöhnlich nicht an. Besonders betroffen sind austenitische Stähle.

Werden die Materialspannungen durch Dauerschlagbeanspruchungen, thermische Wechseldehnungen oder Schwingungen hervorgerufen, so spricht man von Schwingungsrisskorrosion. Diese Korrosionsart ist werkstoffunabhängig.

**Literatur:**

- [1] Elze, J. & Oelsner, G: Metalloberfläche 5 (1958) 129-133
- [2] Binder, G.: Korrosionsschaden durch Elementbildung – Fallbeispiel aus dem Stahlwasserbau; Werkstoffe und Korrosion 50 (1999) 477-483
- [3] Evans: Einführung in die Korrosion der Metalle, Weinheim 1965
- [4] Binder, G. & Graff, M.: Mikrobiell verursachte Korrosion an Stahlbauteilen, 46 Material and Corrosion (1995) 639-648

## 6. Korrosionsschutz

### 6.1 Kathodischer Korrosionsschutz (Wirkungsweise des passiven und aktiven Korrosionsschutzes)

Ein passiver Korrosionsschutz wird durch isolierende Beschichtungen gewährleistet, die auf der Stahloberfläche den Austausch von elektrischen Ladungen bzw. den Zutritt des Elektrolyten zur Stahloberfläche verhindern. Damit wird

- der anodische Teilschritt oder
- der kathodische Teilschritt oder
- beide Teilschritte

gemäß der Beschreibung im Abschnitt 5.2 unterbunden.

Von einem aktiven Korrosionsschutz spricht man, wenn im Stahl durch Zufuhr von Gleichstrom ein Elektronenüberschuss erzeugt und aufrecht erhalten wird, so dass die während einer üblichen Korrosion (anodischer Teilschritt) frei werdenden Elektronen bei der kathodischen Teilreaktion nicht mehr verbraucht werden. Voraussetzung dafür ist, dass das Potential so weit abgesenkt wird bis die anodische Reaktion gestoppt wird, bzw. das Gleichgewichtspotential erreicht ist. Eine zu starke Absenkung sollte allerdings wegen einsetzender chemischen Reaktionen (u. a. H<sub>2</sub>-Entwicklung) vermieden werden.

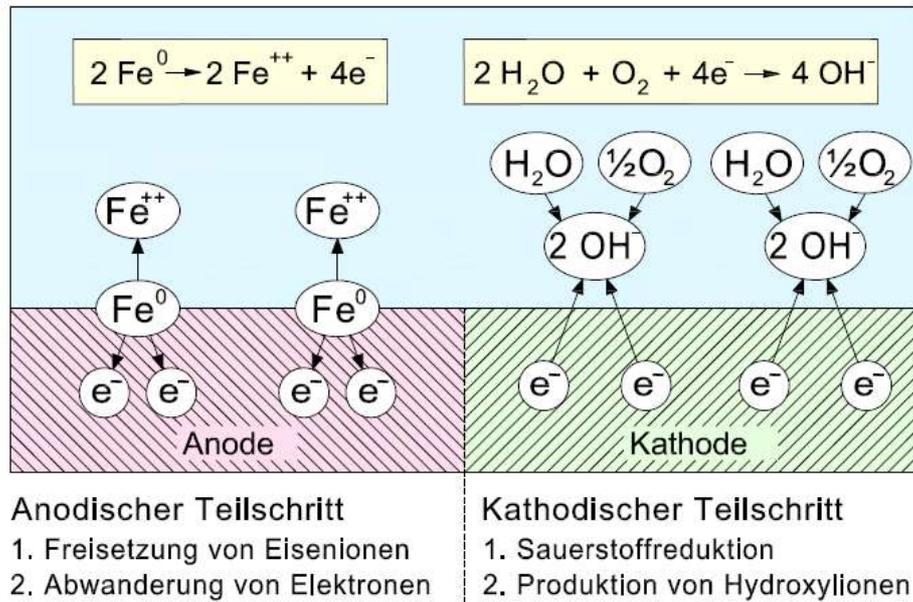
#### 6.1.1 Wirkungsweise kathodischer Korrosionsschutzanlagen

##### Erzeugung der Schutzwirkung

Wie unter Abschnitt 5.2.2 für die anodische Teilreaktion beschrieben wurde, kommt die Eisenauflösung zum Stillstand, wenn sich die Eisenelektrode, d. h. das zu schützende Bauteil, derart mit Elektronen angereichert und negativ aufgeladen hat, dass weitere Eisenatome ihre Elektronen nicht mehr abgeben und deshalb im Metallverbund verbleiben (Selbsthemmung der Korrosionsreaktion).

Diese Selbsthemmung kann aber nur dann stattfinden, wenn im Elektrolyten Akzeptoren (Elektronennehmer) wie Sauerstoff gänzlich fehlen. Das ist unter natürlichen Bedingungen praktisch jedoch nicht der Fall.

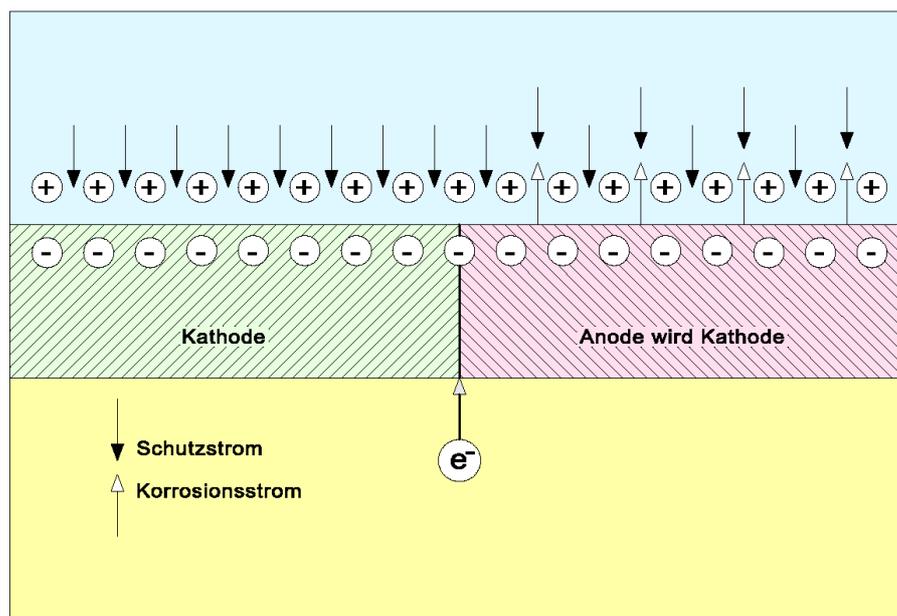
Bei der freien Korrosion in Wässern und Böden wird die Elektronensättigung nicht erreicht bzw. wieder abgebaut, weil der hinzutretende Sauerstoff in Verbindung mit H<sub>2</sub>O (s. Abb. 6.1) entsprechend dem kathodischen Teilschritt (s. Abschnitt 5.2.3) laufend Elektronen verbraucht.



**Abb. 6.1:** Herausbildung anodischer und kathodischer Bereiche am Stahl

Unter diesen Bedingungen wandern nur noch Elektronen aus dem Metall zur Phasengrenze, wenn sie bei entsprechender Anwesenheit von Sauerstoff verbraucht werden können. Dies entspricht einem Stromfluss in technischer Stromrichtung (Schutzstrom), der aus dem Elektrolyten in die Eisenelektrode (Bauteil) fließt. Dabei wird das Bauteil insgesamt zu einer Kathode (s. Abb. 6.2). Anodische Bereiche mit Metallauflösung können demzufolge nicht mehr existieren, denn der für Anoden charakteristische Stromzufluss aus dem Metall in den Elektrolyten wird durch ausreichend hohe kathodische Schutzströme verhindert bzw. kompensiert.

Wenn nur noch kathodische Ströme vorhanden sind, gilt Eisen bzw. Stahl als kathodisch geschützt, wobei die Korrosionsgeschwindigkeit (Restkorrosion) praktisch gegen Null geht.



**Abb. 6.2:** Kompensation der Korrosionsströme

Die Elektronensättigung im Zustand der kathodischen Schutzwirkung entspricht einer negativen Aufladung des Metalls. Damit dieser Ladungszustand auch bei Elektronenverbrauch durch anwesenden Sauerstoff oder andere Akzeptoren erhalten bleibt, genügt nicht nur das Anlegen einer Spannung, sondern diese muss auch so groß sein, dass ständig ein Schutzstrom in die Kathode eingeleitet wird. Seine Stärke ist abhängig von der Kathodenfläche  $a_{\text{Kathode}}$  [m<sup>2</sup>] und der erforderlichen spezifischen Schutzstromdichte  $i$  [mA/m<sup>2</sup>]. Die Schutzstromdichte wird bestimmt durch die Sauerstoffzufuhr, wobei die Strömungsgeschwindigkeit des Elektrolyten, die Temperatur, der Salzgehalt, der Bedeckungsgrad mit Deckschichten u.a. jeweils von Einfluss ist.

### 6.1.2 Das Potential als Beurteilungskriterium

Auf Grund der Messung der freien Korrosionspotentiale an einem zu schützenden Bauwerk kann auf die Korrosionsgeschwindigkeit, den Schutzstrombedarf und qualitative Korrosionsverteilung geschlossen werden. Dabei liegen die Potentiale von Baustahl im Binnenwasser (-430 bis -530 mV/Cu) allgemein positiver als im Meerwasser (-530 bis -600 mV/Cu).

Grundsätzlich deuten negativere Werte auf aktive Korrosionsvorgänge hin, während positivere Werte auf eine gewisse Schutzschichtbildung, z.B. durch den Belag von Korrosionsprodukten, hinweisen.

Aus den Potentialunterschieden an einem Bauwerk lassen sich z.B. Hinweise auf Elementbildung erkennen. Mit der Messung des Potentials kann der Schutznachweis einer Kathodenschutzanlage erbracht werden. Zunächst wird durch die Elektronenzufuhr ein e-Überschuss erzeugt, welcher wiederum eine Potentialverschiebung verursacht. Darüber hinaus kann die Potentialmessung dazu verwendet werden, die Schutzpotentiale zu steuern bzw. zu regeln.

### 6.1.3 Schutzsysteme

#### Erzeugung des Elektronenüberschusses durch kathodische Schutzanlagen

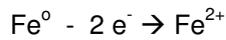
Der benötigte Schutzstrom wird durch kathodische Korrosionsschutzanlagen geliefert und möglichst gleichmäßig über das Bauwerk verteilt. Dabei ist es unerheblich, auf welche Weise er erzeugt wird. Er kann dem Wechselstromnetz entnommen (Fremdstromanlagen) oder galvanisch erzeugt werden (Anlagen mit galvanischen Anoden, so genannten Opferanoden).

#### a) Fremdstrom

Das Wechselstromnetz liefert einer Kathodischen Schutzanlage mit Fremdstrom die benötigten Elektronen (s. Abb. 6.3). Dabei ist es erforderlich, die Netzspannung mit Hilfe eines Schutzstromgeräts auf eine niedrige Spannung von < 50 Volt zu bringen und mittels Gleichrichter in Gleichstrom umzuwandeln. Am Minuspol des Schutzstromgeräts stehen dann die benötigten Elektronen zur Verfügung und werden von da aus in das Bauwerk geleitet. Das entspricht der technischen Stromrichtung aus dem Elektrolyten in das Bauwerk.

In technischer Stromrichtung muss dem Elektrolyten aus dem Pluspol zudem Gleichstrom zugeführt werden. Das geschieht über metallisch leitende Elektroden, die als Fremdstromanoden bezeichnet werden und in den Elektrolyten eintauchen.

Während diese Anoden dem Elektrolyten im technischen Sinne Strom zuführen, gilt unter Beachtung der Elektronenflussrichtung, dass über die Anoden dem Elektrolyten Elektronen entnommen werden. Dadurch wird der Elektronenmangel unter Metallauflösung (Anodenverbrauch) gemäß der Formel (Anodenreaktion)



Gl. 6.1)

behalten.

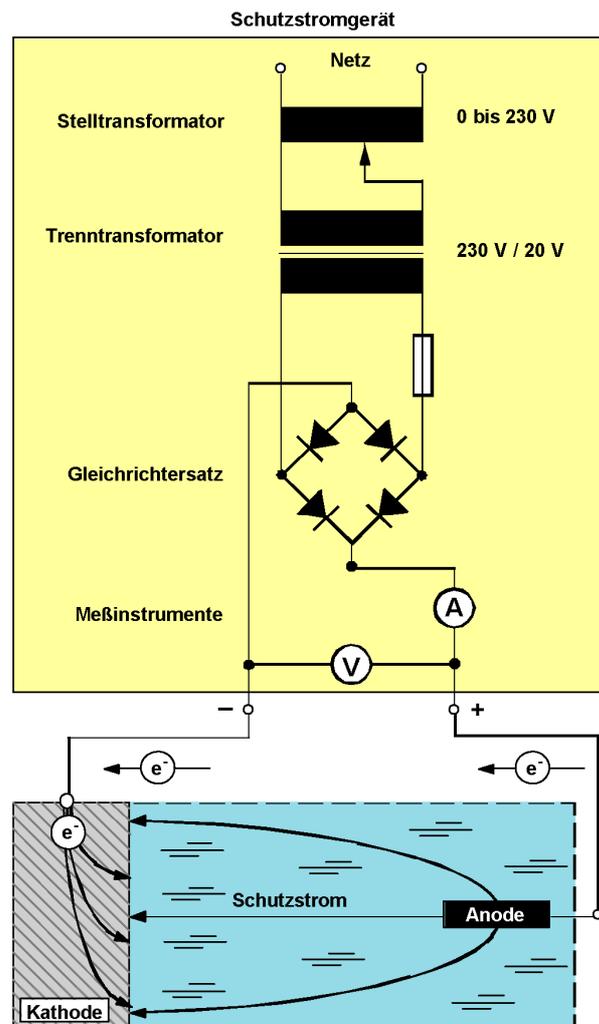
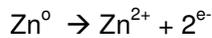


Abb. 6.3: Fremdstrom Schutzanlage

Um die Lebensdauer der Fremdstromanoden zu erhöhen, werden Werkstoffe verwendet, die schwer lösliche Reaktionsprodukte bilden. Letztere müssen die Anodenfläche porenfrei abdecken und zudem in der Lage sein, Elektronen zu leiten. Daher tragen diese so genannten inerten (reaktionsträgen) Anoden eine Schutzschicht, die sich nur sehr stark verzögert verbraucht.

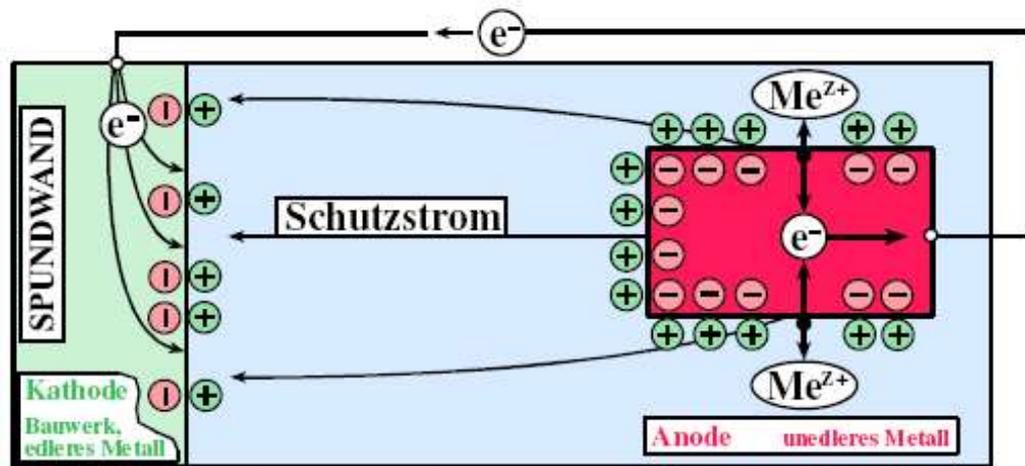
## b) Galvanische Anoden (Opferanoden)

Durch die leitende Verbindung von Metallen mit unterschiedlichen elektrochemischen Eigenschaften im Elektrolyten kann, ähnlich einer Taschenlampenbatterie, ein Stromfluss aufgrund des Potentialunterschiedes erzeugt werden. Dabei wird das unedlere Metall zur Anode und löst sich unter Elektronenlieferung auf:



Gl. 6.2)

Die frei werdenden Elektronen fließen über die elektrisch leitende Verbindung in das edlere Metall, d. h. in das Bauwerk (s. Abb. 6.4).



Galvanische Schutzanlage

Abb. 6.4: Funktionsweise einer galvanischen Schutzanlage

Das in dieser galvanischen Kette edlere Metall gibt, unter gleichen elektrolytischen Bedingungen, wesentlich weniger Elektronen ab als das unedlere Metall und wird zur Kathode. Dabei übernimmt es den für seinen kathodischen Schutz erforderlichen Überschuss an Elektronen. Abtragungswerte bestimmter Metallkombinationen sind in Tabelle 5.2 zusammengestellt. Damit ist im Prinzip ein galvanisches Korrosionselement geschaffen. Nur wird dabei gezielt das zu schützende Bauwerk zur Kathode gemacht und die Korrosion ebenfalls gezielt auf die (austauschbare) Anode verlagert.

Als unedlere Reaktionspartner für Eisen und niedriglegierte Stähle (Baustähle) können Zink (Zn), Aluminium (Al) und Magnesium (Mg) verwendet werden.

### 6.1.4 Technische Vor- und Nachteile beider Schutzsysteme

Obwohl die kathodische Schutzwirkung auf den gleichen elektrochemischen Vorgängen beruht und grundsätzlich sowohl mit galvanischen Anoden als auch mit Fremdstrom gleich gut erzielt werden kann, sind einige charakteristische Eigenarten und Unterschiede zu berücksichtigen.

#### a) Fremdstromanlagen

Fremdstromanoden werden in speziellen Halterungen isoliert gegen das zu schützende Bauwerk angebracht und durch Kabelverbindungen an das Schutzstromgerät angeschlossen. Der Installationsaufwand ist relativ hoch (eigener Betriebsraum, Kabeldurchführungen), kann aber durch Einplanung bei neuen Bauwerken erniedrigt werden.

Durch Messungen der Spannung, des Widerstandes oder des Stromes über die Kabelverbindungen kann die Funktion geprüft werden. Die Schutzanlagen können hinsichtlich der Schutzstromabgabe gesteuert werden. Automatische Potentialregelungen ermöglichen eine optimale Anpassung an veränderte Betriebsbedingungen.

Hinsichtlich der Immersionsmedien erfährt der Einsatz von Fremdstromanlagen keine Beschränkung – im Unterschied zu den galvanischen Anoden. Eine exakte Messung der Potentiale zur Optimierung der Einstellung ist durch das Ausschalten der Anlage gegeben.

Fremdstromanoden und Kabel müssen generell gegen zerstörerische mechanische Einwirkungen (Treibgut, Schiffsstoß, Eisgang) geschützt werden.

Mit Fremdstromanoden können gezielt verschiedene Schutzbereiche, auch im großflächigen Maßstab, eingeteilt und umgesetzt werden.

Die Wartung und der Betrieb von Fremdstromanlagen erfordern besondere Sorgfalt. Die Funktion muss mindestens einmal jährlich durch Fachpersonal überprüft werden. Von Fremdstromanlagen können schädliche Wirkungen auf Nachbaranlagen oder -bauwerke ausgehen. Bei der Inbetriebnahme, wie auch bei Nachkontrollen, sind daher zusätzliche Überwachungsmessungen erforderlich.

#### b) Anlagen mit galvanischen Anoden

Galvanische Anoden werden in der überwiegenden Zahl der Anwendungsfälle direkt an das Bauwerk angeschlossen. Das geschieht über Befestigungselemente, die mit dem Bauwerk metallisch leitend verbunden werden.

Durch diese Anordnung (Kurzschlussverbindung) können galvanische Anoden nicht direkt messtechnisch auf Funktion geprüft werden, da sich die Verbindung zu Messzwecken nicht auftrennen lässt. Sie muss deshalb so ausgeführt sein, dass ein absolut dauerhafter, niederohmiger Kontakt zum Bauwerk auch ohne Nachkontrollen gewährleistet ist. Dies ist optimal durch Anschweißen erzielbar (vgl. auch Kapitel 10). Bei Befestigung über Schraubverbindungen muss der elektrische Kontakt besonders gesichert werden.

Durch den permanent vorhandenen Kontakt zwischen Bauwerk und Anoden können Ein-/Ausschaltmessungen zum Nachweis der kathodischen Schutzwirkung (s. Abschnitt 7.2.1.6) nicht durchgeführt werden. Ein exakter Nachweis der Schutzwirkung an der Grenze des Schutzpotentials ist, zumindest in Wässern mit hohem spezifischem Widerstand, nicht möglich. Stattdessen sind angemessene Sicherheitszuschläge auf die Anodenstromabgabe zu berücksichtigen.

An stärker räumlich strukturierten Schutzobjekten ist wegen der geringen Treibspannung und wegen des geringen Abstands zwischen galvanischer Anode und der Kathode (Bauwerk) die Stromverteilung ungünstig. Deshalb kann insbesondere bei höheren spezifischen Widerständen eine größere Stückzahl von Einzelanoden erforderlich werden, im Unterschied zu einer Fremdstromanlage.

Bei schwankender Leitfähigkeit des Elektrolyten und/oder Temperaturschwankungen ändert sich proportional dazu die Stromabgabe galvanischer Anoden. Das kann bei entsprechender Schwankungsbreite zu einem laufenden Wechsel zwischen Über- und Unterschutz führen (Überschutz ist allerdings nur bei Magnesiumanoden möglich). Umgekehrt können Schichtenbildung und chemische Ausfällungen an der Anodenoberfläche Stromabgabe und damit die Funktion einschränken.

Bei galvanischen Anoden ist die Spannung (V), die den Schutzstrom durch den Elektrolyten treibt, nach oben hin begrenzt. So stehen

- beim Zink ca. 0,25 Volt,
- beim Aluminium ca. 0,35 Volt und
- beim Magnesium ca. 0,65 Volt

Treibspannung gegen das Bauwerk zur Verfügung. Der Schutzstrom lässt sich deswegen nur durch die Oberfläche und Anzahl der Anoden beeinflussen. Beide müssen sorgfältig auf den Anfangs- und Dauerstrombedarf des Bauwerks abgestimmt werden.

Wegen der begrenzten Treibspannungen können Zink- und Aluminiumanoden nur im Meer- und stärker salzhaltigen Brackwasser verwendet werden, d. h. bei ausreichend hoher Leitfähigkeit des Elektrolyten. Magnesiumanoden lassen sich auch bei geringerer Leitfähigkeit im Brack- und Süßwasser einsetzen.

Eine mit galvanischen Anoden konzipierte Schutzanlage ist während der vorgesehenen Lebensdauer äußerst betriebssicher und erfordert nur ein Minimum an Wartungs- und Kontrollaufwand. Galvanische Schutzanlagen sind auf Grund ihres einfachen Aufbaus mechanisch sehr robust. Schädliche Beeinflussungen benachbarter Bauwerke, ausgehend von Streuströmen galvanischer Schutzanlagen sind nicht zu erwarten.

Mit Ausnahme von Magnesium sind bei galvanischen Anoden Schäden an geeigneten Beschichtungen durch Überschutz in der Regel nicht zu befürchten.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass Opferanoden bevorzugt in Spezialfällen (schwierige Geometrie, kleine Flächen) eingesetzt werden. Der Einbau kann beliebig erfolgen wobei eine sofortige Schutzwirkung zu erzielen ist. Als Nachteil sind die notwendige Erneuerung der Anoden, die Massenzunahme am Bauwerk und eine gewisse Schwermetallabgabe in das umgebende Medium zu werten.

## **6.2 Beschichtungen und deren Beeinflussung durch kathodische Korrosionsschutzverfahren**

### **6.2.1 Beschichtungen auf Stahlwasserbauteilen**

Der Korrosionsschutz von Stahlwasserbauteilen mit einem Beschichtungssystem, das die Metalloberflächen vom Elektrolyten trennt, wird als passiver Korrosionsschutz bezeichnet. Als aktiven Korrosionsschutz versteht man unter anderem den Einsatz von Kathodenschutzanlagen.

Aktiver und passiver Korrosionsschutz können unter bestimmten Voraussetzungen jeder für sich den Schutz von Stahlwasserbauwerken übernehmen. In vielen Fällen ist eine Kombination beider Verfahren vorteilhaft und mit einem synergetischen Effekt verbunden.

Langjährige Erfahrungen belegen, dass Beschichtungen den Werkstoff Stahl länger als 20 Jahre gegen Korrosion schützen können. Voraussetzung sind das Strahlen gemäß Vorbereitungsgrad Sa 2 ½ nach DIN EN ISO 12944 [1], ein geeignetes Beschichtungssystem sowie eine qualitativ hochwertige Ausführung der Korrosionsschutzarbeiten (Klima-, Applikationsbedingungen).

Vornehmlich im Bereich der Wasserwechselzone werden die Stahlwasserbauten durch Schiffstöße, Eisgang, Treibgut und Wellenschlag mechanisch belastet. Die Standzeiten insbesondere in maritimer Umgebung können dadurch reduziert werden.

Der Langzeitkorrosionsschutz (Standzeiten > 25 Jahre) von Stahl im Wasser und im Boden kann wirksam nur mit einem kombinierten Schutz erreicht werden.

Da eine Beschichtung den kathodischen Schutzstrombedarf deutlich vermindert, ist eine Kombination von Beschichtung und kathodischem Schutz auch wirtschaftlich sinnvoll.

Das Verfahren des kathodischen Schutzes ist an physikalische Gesetzmäßigkeiten und an Grenzwerte elektrochemischer Parameter gebunden. Deshalb sollte man bei der Auswahl von Beschichtungsstoffen darauf achten, dass man geprüfte und zugelassene Beschichtungssysteme einsetzt.

Die Potentiale an kathodischen Schutzanlagen müssen mindestens auf  $-950 \text{ mV/Cu}$  für die Schutzwirkung abgesenkt werden. Um die Beschichtungen und den Stahl nicht zu schädigen, sollte ein Potential von ca.  $-1050 \text{ mV/Cu}$  nicht unterschritten werden.

In der DIN EN ISO 12944 „Korrosionsschutz von Stahlbauten durch Beschichtungssysteme, Teil 5 Beschichtungssysteme“ sind Grundlagen und Beispiele für passiv wirkende Korrosionsschutzsysteme aufgeführt. In Anlehnung an die Tabelle A8 dieser Norm hat die Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) eine Liste mit Systemvorschlägen erarbeitet (Tabelle 6.1).

Für in Böden und Wässern verlegte Stahlrohrleitungen für äußere organische Umhüllungen im Zusammenwirken mit dem kathodischen Schutz gilt die DIN EN 12068 [2].

Ein passiver Schutz besteht im Allgemeinen aus Grund- und Deckbeschichtungen.

Für die Grundbeschichtungen sollten Zinkstaubpigmente verwendet werden, denn wegen der Spannungsdifferenz zwischen Zink und Eisen wirkt das Zinkstaubpigment im Umfeld von Beschichtungsbeschädigungen kathodisch schützend auf den unlegierten Stahl. Außerdem bilden sich nach längerer Standzeit auch in einer unter Deckbeschichtungen liegenden Zinkstaubgrundierung durch den Zutritt bzw. infolge eindiffundierter Feuchtigkeit Zinkoxide und -hydroxide. Diese großvolumigen Umwandlungsprodukte verstopfen die in der Grundbeschichtung noch vorhandenen Poren und verdichten die Schicht insgesamt. Die Widerstandsfähigkeit der Zinkstaubgrundierung gegenüber den Einwirkungen aus dem Elektrolyten wird dadurch erheblich verstärkt.

System Nr.	Oberflächen-vorbereitung		Grundbeschichtung				Zwischen- und Deck-Beschichtung			Gesamtschicht-Dicke	
	≥ Sa 2½	P Sa 2½	Bindemittel	Pigment	Nr	TFD [µm]	Bindemittel	Nr	TFD [µm]	Nr	TFD [µm]
1	X		Ep	Zn	1	50	Ep <sup>1</sup>	2	300	3	350
2	X		PUR 1k	Zn	1	50	PUR 1k <sup>1</sup>	2	300	3	350
3	X		EP	Zn	1	50	EP <sup>1</sup>	3	450	4	500
4	X		PUR 1k	Zn	1	50	PUR1k <sup>1</sup>	3	450	4	500
5	X		EP	Zn	1	50	EP <sup>1</sup>	1	450	2	500
6	X						EP <sup>1</sup>	3	500	3	500
7	X						PUR 1k <sup>1</sup>	3	500	3	500
8	X						EP <sup>1</sup>	1	500	1	500
9	X	X	EP	Fe-Gl	1	100	EP <sup>1</sup>	2	400	3	500
10	X		EP	Zn	1	50	EP <sup>1</sup>	2	950	3	1000
11	X		EP	Zn	1	50	EP <sup>1</sup>	1	950	2	1000
12	X		EP	Zn	1	50	EP <sup>1</sup>	2	1950	3	2000
13	X		EP	Zn	1	50	EP <sup>1</sup>	1	1950	2	2000
14	X						EP <sup>1</sup>	2	1000	2	1000
15	X						EP <sup>1</sup>	1	1000	1	1000
16	X						PUR	1	1000	1	1000
17	X						PESu	1	1000	1	1000
18	X						EP <sup>1</sup>	2	2000	2	2000
19	X						PUR	2	2000	2	2000
20	X						PESu	2	2000	2	2000
21	X						PUR	1	2000	1	2000
22	X						PESu	1	2000	1	2000

EP = Epoxid<sup>1</sup> auch in Kombination mit Kohlenwasserstoffharzen (CH)  
 PUR = Polyurethan, 2komponentig bzw. Teerersatzprodukten (TE)  
 PUR 1k = Polyurethan, 1komponentig Lf = lösemittelfrei  
 PESu = Polyester, ungesättigt La = lösemittelarm  
 Fe-Gl = Eisen-Glimmer

**Tabelle 6.1:** Einsatzempfehlung von Beschichtungssystemen für den Stahlwasserbau [3]

Als Bindemittel haben sich im Stahlwasserbau vor allem Epoxidharze (EP) und 1K-Polyurethane (1K-PUR) bewährt. Für die Auswahl sind unter anderem folgende Eigenschaften relevant:

Epoxidharze sind ausgezeichnet chemikalienbeständig, lösemittelarm bzw. lösemittelfrei rezeptiert und deshalb in hohen Schichtdicken applizierbar.

Die 1K-Polyurethane sind luftfeuchtigkeitshärtend und eignen sich für die Applikation bei schwierigeren Umgebungsbedingungen (z.B. hohe relative Luftfeuchte, niedrige Temperaturen, Tide).

Eine hohe Nasshaftfestigkeit der Beschichtung an der Stahloberfläche, die Verwendung abriebfester Zwischen- und Deckbeschichtungen sowie eine an die Beanspruchung angepasste größere Schichtdicke erhöhen vor allem die Korrosionsschutzwirkung. Es ist darauf zu achten, dass Transport- und Montageschäden ausgebessert werden müssen. Je nach mechanischer Belastung kann es bei der Nutzung der Stahlwasserbauwerke zu Schadstellen kommen. Diese sind unbedingt bei der Ermittlung des Schutzstrombedarfes und der Schutzstromverteilung zu berücksichtigen.

Korrosionsschutzsysteme, bestehend aus mehreren Schichten, verhalten sich günstiger in Bezug auf Unterrostung und Unterwanderung als Einschichtsysteme mit höherer Schichtdicke.

Ohne kathodischen Schutz führen Fehlstellen und Beschädigungen in den Beschichtungen in den meisten natürlichen Gewässern zu Elementbildungen. Die großflächigen, unbeschädigten Beschichtungsbereiche werden dabei zur Kathode, die ungeschützten Schadstellen bilden die Anode. Dabei kann Mulden- und Lochkorrosion auftreten. Abtragungsgeschwindigkeiten bis zu mehreren mm/a sind möglich.

Allein durch diese Elementbildungen können sich neben den Fehlstellen und Verletzungen in der Beschichtung infolge kathodischer Polarisation und Osmose Blasen bilden.

Bei pH-Werten über 10,5 korrodiert der Stahl unter der kathodisch polarisierten Blase zwar nicht, aber die Blase selbst führt später durch Aufbrechen zu einer anodischen Fehlstelle.

Beschichtungsbeschädigungen und Fehlstellen, die die Schutzwirkung beeinträchtigen, sollten von Zeit zu Zeit ausgebessert werden. Die Ausbesserung muss hinsichtlich der Schutzwirkung und Lebensdauer der Originalbeschichtung gleichwertig sein. Dies gilt im besonderen Masse für Mischinstallationen aus unlegierten und legierten Baustählen. Die Fremdstromanlagen sind während der Applikation und der Trocknungs-/Härtungsphase des Beschichtungssystems auszuschalten.

### **6.2.2 Kathodischer Korrosionsschutz beschichteter Stahlwasserbauteile**

Die Kombination von kathodischem Schutz mit Beschichtungen bietet den Vorteil, dass einerseits an den unvermeidlichen Fehlstellen und an nachträglichen Verletzungen durch Überlagerung mit Schutzstrom die Korrosionsschäden unterbunden werden. Andererseits ist der insgesamt benötigte Schutzstrom um Zehnerpotenzen geringer als bei unbeschichteten Flächen.

Für den passiven Korrosionsschutz sollten geprüfte und zugelassene Beschichtungssysteme ausgewählt werden, die auch gegenüber kathodischen Korrosionsschutzverfahren beständig sind.

Die Bindemittel müssen alkalienbeständig und die Beschichtungen möglichst dicht sein, weil der Wasser- und Ionentransport durch die Beschichtung hindurch bei kathodischer Belastung beschleunigt wird. Alle diese Vorgänge zusammengenommen, können eine nicht speziell für den kathodischen Schutz geeignete Beschichtung schnell zerstören. Es ist äußerst wichtig, nur geeignete Beschichtungssysteme in ausreichender Schichtdicke zu applizieren. Die Art der Applikation und der Trocknungs-/Härtungsprozess bestimmen wesentlich die Beschichtungsfilmstruktur.

Ein Schutzpotential von  $-850 \text{ mV/Cu}$  (Grenzwert, bei dem der volle kathodische Schutz beginnt) führt in der Regel noch nicht zu einer nennenswerten Zunahme der Blasenbildung. Diese setzt bei den meisten der bisher angewandten Beschichtungen erst bei Potentialen von  $-950 \text{ mV/Cu}$  ein und wird mit negativeren Werten verstärkt. Die Blasen bilden sich dann zumeist schnell. Anzahl und Größe der Blasen sind vom Beschichtungsaufbau und der Schichtdicke abhängig.

Es ist aber nicht realistisch, davon auszugehen, dass es in der Mehrzahl der Fälle möglich ist, durch gleichmäßig zwischen  $-850 \text{ mV/Cu}$  und  $-950 \text{ mV/Cu}$  verteilte Potentiale weniger geeignete Beschichtungen zu schonen. In Anodennähe lassen sich negativere Potentiale durch anderweitige Zwänge nicht vermeiden. Deshalb sind Beschichtungen zu fordern, die mindestens bis in den Bereich der Potentiale von galvanischen Anoden im Meerwasser mit  $-1050 \text{ mV/Cu}$ , (Zink- und Aluminiumanoden) beständig sind. Aus diesem Grund dürfen Magnesiumanoden im Meerwasser (Eigenpotential  $-1650 \text{ mV/Cu}$ ) in Kombination mit Beschichtungen nicht verwendet werden.

Unter höheren Temperaturen beginnt die Blasenbildung früher und nimmt wesentlich stärker zu, als bei niedrigeren Temperaturen. Über einen längeren Zeitraum hinweg ist z. B. eine Temperaturerhöhung von  $+25 \text{ °C}$  auf  $+35 \text{ °C}$  für die Beschichtung nachteiliger, als ein Absenken des Schutzpotentials von  $-850 \text{ mV/Cu}$  auf  $-950 \text{ mV/Cu}$ .

Im Flusswasser tritt in der Regel eine geringere Blasenbildung auf als im Meerwasser. Wechselnde Süß- und Salzwasserbeanspruchungen erhöhen im Allgemeinen die Blasenbildung im Vergleich zur reinen Meerwasserbelastung.

Insofern ist eine fehlerstellenarme Applikation bei Brack- und Meerwasser oder ähnlichen Elektrolyten besonders wichtig. Sie lässt sich gut mit lösemittelfreien und mehrschichtigen Systemen erreichen.

Die Neigung zur Blasenbildung/Unterwanderung hängt zunächst von der Stoff-Formulierung der Grund- und Deckbeschichtung ab. Die Bindemittelbasis der Beschichtungssysteme ist dafür aber allein nicht ausschlaggebend, eher die spezielle Rezeptur des Herstellers. Innerhalb der einzelnen Bindemittelgruppen ist demzufolge der Streubereich für die Neigung zur Blasenbildung außerordentlich groß. Blasenbildung und Unterwanderung treten auch bei Unterschreitung von Gesamtschichtdicken ( $< 350 \text{ }\mu\text{m}$ ), bei zu geringen Überdeckungen von Zinkstaubgrundbeschichtungen und bei Mischsystemen unterschiedlicher Bindemittel auf.

Bei der Rezeptierung von Langzeitkorrosionsschutzsystemen ist zu beachten, dass bestimmte Eigenschaften, wie Abriebverhalten, Schlagbeständigkeit und Kathodenschutzverträglichkeit sich gegenläufig verhalten können.

Werden Fremdstrom- oder galvanische Anoden bei geringer Leitfähigkeit des Elektrolyten in unmittelbarer Nähe beschichteter Stahlflächen installiert, so ist wegen der dann intensiveren Schutzstromeinwirkung auf die benachbarten Flächen im Umkreis der Anoden ein verstärkter passiver Korrosionsschutz ( $> 2000 \text{ }\mu\text{m}$ ) vorzusehen. Um für eine homogenere Stromverteilung zu sorgen, sollten zum Beispiel einseitig geschlitzte PE-Rohre installiert werden, in denen dann die Anoden

eingbracht werden. Das PE-Rohr ist so zu installieren, dass die geschlitzte Seite der Stahlfläche abgewandt ist. Dieses PE-Rohr dient dabei zusätzlich als Anodenschutzrohr gegen Wellenschlag, Eisgang und ähnliche mechanische Belastung.

Während der Inbetriebnahme einer mit Fremdstrom gespeisten kathodischen Schutzanlage darf das Potential nur allmählich abgesenkt werden, um Beschädigungen an der Beschichtung zu vermeiden.

### **6.2.3 Überprüfung der Verträglichkeit von Beschichtungen mit dem kathodischen Korrosionsschutz**

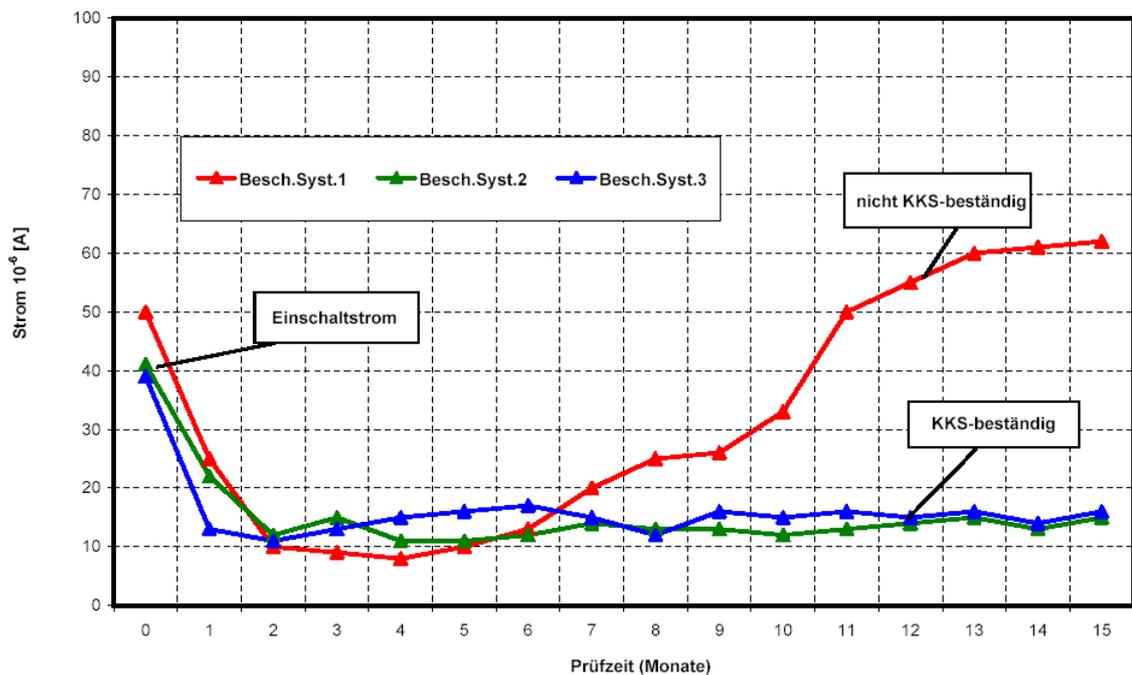
Beschichtungssysteme, die mit kathodischem Schutz kombiniert werden sollen, sind zunächst in geeigneten Prüfverfahren daraufhin zu untersuchen, ob ihr Einsatz unter den gegebenen Bedingungen vertretbar ist. Aussagekräftige Prüfergebnisse können zumeist schon nach 6 Monaten erzielt werden. Längere Prüfzeiten (15 Monate) in verschiedenen Medien lassen bessere Differenzierungen der Prüfergebnisse zu.

Bewährte Beschichtungssysteme auf Teerpech- bzw. Teerepoxidharzbasis werden aus Arbeits- und Umweltschutzgründen ersetzt durch reine oder verschnittene Epoxide oder Polyurethane. Als verseifungsbeständige Bindemittel sind diese nicht automatisch kathodenschutzverträglich. Hinsichtlich der Oberflächenvorbereitung, den Verarbeitungsbedingungen und der Applikation sind hohe Ansprüche zu erfüllen. Die Untersuchung der genauen Beschichtungsaufbauten ist deshalb angeraten.

Zur Untersuchung sind normierte Prüfverfahren anzuwenden. Die auf Prüfplatten aufgetragenen Beschichtungen werden dabei in einem wassergefüllten Behälter mit einem Schutzstrom belastet. Die sich dabei ergebenden Veränderungen, wie z. B. Blasenbildungen und Unterwanderungen an der Beschichtung, werden zur Beurteilung ihrer Verträglichkeit mit dem kathodischen Schutzstrom herangezogen.

Als sehr aussagefähig hat sich die Aufzeichnung des Schutzstrombedarfs während der gesamten Prüfung ergeben, wie sie in Abb. 6.5 aufgezeigt ist.

### Schutzstrombedarf von Beschichtungen beim KKS-Test in Meerwasser



**Abb. 6.5:** Stromverbrauch verschiedener Beschichtungen nach 15 Monaten Prüfzeit  
Quelle: BAW (unveröffentlicht)

Eine Bewertung der einzelnen Prüfergebnisse, zu der auch die Haftfestigkeit gehört, sollte von erfahrenen Fachleuten vorgenommen werden.

Die Einzelheiten des Prüfungsablaufes sind den Vorschriften

- STG-Richtlinie 2220, „Prüfung und Beurteilung der Verträglichkeit von Unterwasserbeschichtungssystemen für Schiffe und Seebauwerke mit dem kathodischen Korrosionsschutzverfahren“ [4]
- DIN ISO 15711 „Bestimmung des Widerstandes gegen kathodische Enthaltungen von Beschichtungen in Meeresklima“ [5]
- Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe (BAW) „Richtlinie zur Prüfung von Beschichtungssystemen für den Korrosionsschutz im Stahlwasserbau“ [6]

zu entnehmen.

Folgende Tendenzen sind nach Auswertung der KKS-Prüfungen von ca. 200 Beschichtungssystemen bei der BAW erkennbar:

#### Untergrund

- Bei Oberflächenvorbereitungen schlechter als Sa 2 ½ fällt die Haftfestigkeit mit zunehmender Prüfdauer unzulässig ab. Dies gilt auch für hohe Schichtdicken (> 1000 µm).
- lösliche aktive Pigmente in der Beschichtung führen zu Unterwanderungen bzw. Blasenbildung in der Beschichtung und am Substrat.
- Zinkstaubgrundierungen zeigen eine deutliche geringere Unterwanderungstendenz als Beschichtungssysteme ohne Grundierung.

#### Schichtdicke

- bei Gesamtschichtdicken < 350µm häuft sich die von Verletzungen ausgehende Blasenbildung
- dies gilt auch bei zu geringer Überdeckung von Zinkstaub-Grundbeschichtungen

#### Stromverbrauch

- ungeeignete Beschichtungsaufbauten sind gekennzeichnet durch Stromverbrauch, der über die Einschaltströme hinausgeht.
- beim Einsatz von Zinkstaubgrundierungen ist in der Regel ein geringerer Stromverbrauch festzustellen.
- Die Delamination am Substrat oder zwischen den Schichten des Beschichtungssystems, z.B. bei nicht aufeinander abgestimmten Schichten, erfordern häufig hohe Schutzströme.

Eine Auswahl geprüfter und zugelassener Beschichtungssysteme ist im Internet unter [www.baw.de](http://www.baw.de) abrufbar [7].

#### **Literatur:**

- [1] DIN EN ISO 12944: Korrosionsschutz von Stahlbauten durch Beschichtungssysteme
- [2] DIN EN 12068: Kathodischer Schutz von Stahlrohrleitungen in Böden und Wässern
- [3] Liste der empfohlenen Beschichtungssysteme (für den Korrosionsschutz im Stahlwasserbau); [www.baw.de](http://www.baw.de)
- [4] STG-Richtlinie Nr. 2220: Planung und Beurteilung der Verträglichkeit von Unterwasserbeschichtungssystemen für Schiffe und Seebauwerke mit dem kathodischen Korrosionsschutz
- [5] DIN EN ISO 15711: Bestimmung des Widerstandes gegen kathodische Enthaltungen Beschichtungen im Meerwasser

- [6] Richtlinien für die Prüfung von Beschichtungssystemen für den Korrosionsschutz im Stahlwasserbau (RPB); [www.baw.de](http://www.baw.de)
- [7] Liste der zugelassenen Systeme (Beschichtungsstoffe für den Stahlwasserbau); [www.baw.de](http://www.baw.de)

## 7. Grundlagen der elektrischen Messtechnik

Zur Ermittlung der Korrosionsgefährdung oder der Wirksamkeit des kathodischen Schutzes werden vorwiegend elektrische Messungen durchgeführt.

Dabei geht es um die Bestimmung der drei Messgrößen Spannung, Strom und Widerstand. Die in der Messtechnik des kathodischen Korrosionsschutzes immer wieder auftauchende Potentialmessung ist dabei nichts weiter als eine hochohmige Messung der Spannung zwischen dem Messobjekt und einer Referenzelektrode.

Da die zu messenden Werte - je nach äußeren Bedingungen - stark schwanken können, werden diese Messungen teilweise auch mit automatischen Messwerterfassungsgeräten, so genannten Datenloggern, gespeichert und dann an einem Rechner ausgewertet. Diese Langzeitmessungen können bei einer schon installierten kathodischen Korrosionsschutzanlage mit Fernüberwachung auch über einen zentralen Rechner erfolgen.

### 7.1 Elektrische Messgrößen

Die zur Messung von Spannung und Strom verwendeten Messgeräte besitzen zwei Anschlussklemmen. Diese werden mit dem Messobjekt, z.B. Spundwand und Referenzelektrode oder einen aufgetrennten Stromkreis verbunden.

Somit ist jedes dieser Messobjekte und jedes Messgerät ein Zweipol, welches durch  $I(U)$ -Kennlinien charakterisiert ist. Bei einer Messung werden die beiden Kennlinien von Messobjekt und Messgerät übereinander gelegt und der Schnittpunkt der beiden Kurven stellt dann den angezeigten Messwert dar. In Abb. 7.1 ist eine solches Strom-Spannungs-Diagramm exemplarisch dargestellt, in dem die Kennlinie des Messobjektes mit einem Strom  $I_0$  bei  $U=0$ , der Kurve  $I(U)$  und der Spannung  $U_0$  bei  $I=0$ , sowie die Kennlinien zweier Messgeräte (1) und (2) gezeigt werden. Das Messgerät (1) ist dabei ein Messgerät mit einem niedrigen Innenwiderstand und das Messgerät (2) besitzt einen hohen Innenwiderstand.

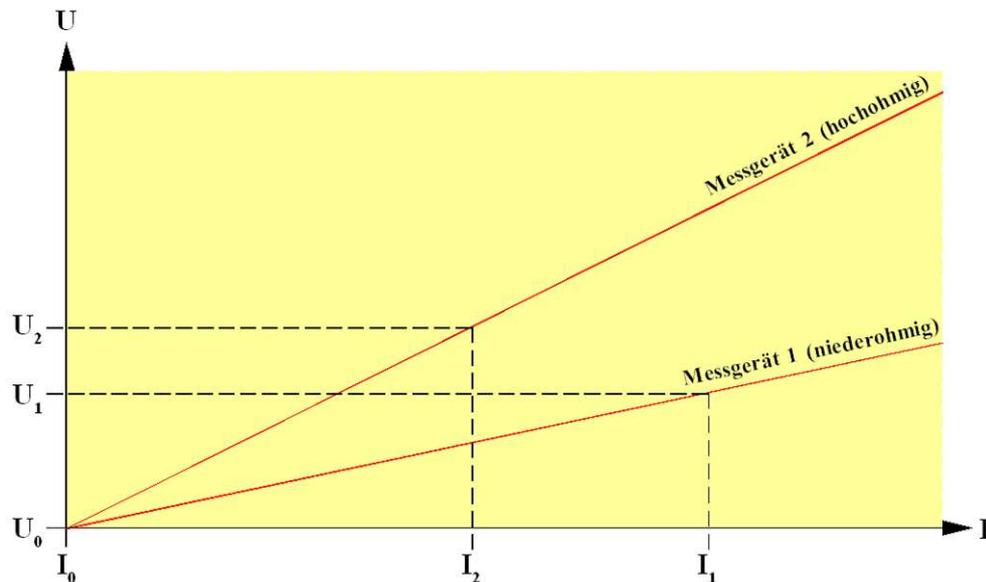
Dabei ergeben sich für die beiden Messgeräte jeweils ein Wertepaar  $(U_1/I_1)$  bzw.  $(U_2/I_2)$ .

Bei einer Spannungsmessung ist der Messfehler zwischen angezeigte Spannung und eigentlicher Spannung (vom Messgerät unbelasteten Spannung) mit dem Messgerät (1) geringer als mit dem Messgerät (2), d.h. bei einer Spannungsmessung ist ein hochohmiges Messgerät vorteilhaft. Bei Potentialmessungen werden normalerweise Messgeräte mit einem Innenwiderstand von mindestens 1 M $\Omega$  eingesetzt.

Für Strommessungen ergibt sich das Gegenteil. Bei diesen Messungen eignet sich eine niederohmiges Messgerät besser, d.h. der Messfehler zwischen angezeigtem Strom und vom Messgerät unbelasteten Strom ist mit dem Messgerät (2) geringer.

Widerstände in und von Elektrolytlösungen werden mit niederfrequentem Wechselstrom gemessen, um das Ergebnis nicht durch Polarisierungseffekte zu verfälschen. Die Messungen erfolgen meist vierpolig, wodurch Spannungen an den Ausbreitungswiderständen der Messelektroden eliminiert werden.

Als Widerstandsmessgeräte werden handelsübliche Erdungsmesser mit vier Anschlussklemmen benutzt.



**Abb. 7.1:** Strom-Spannungs-Diagramm

## 7.2 Potentialmessung

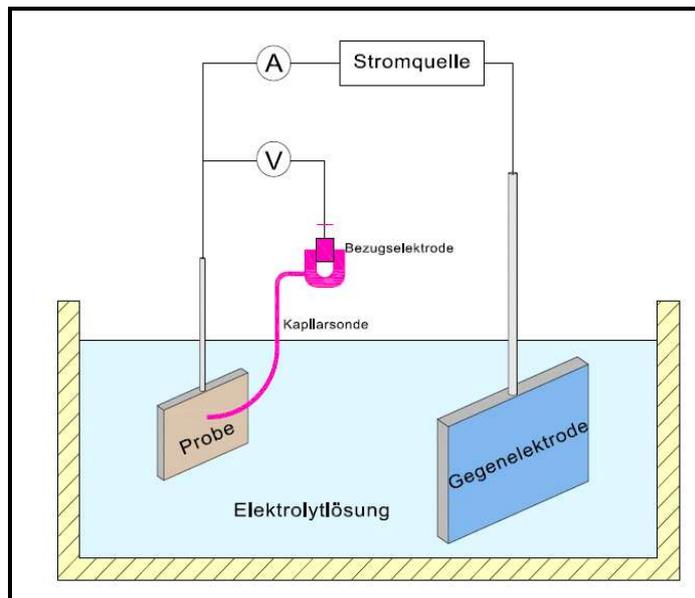
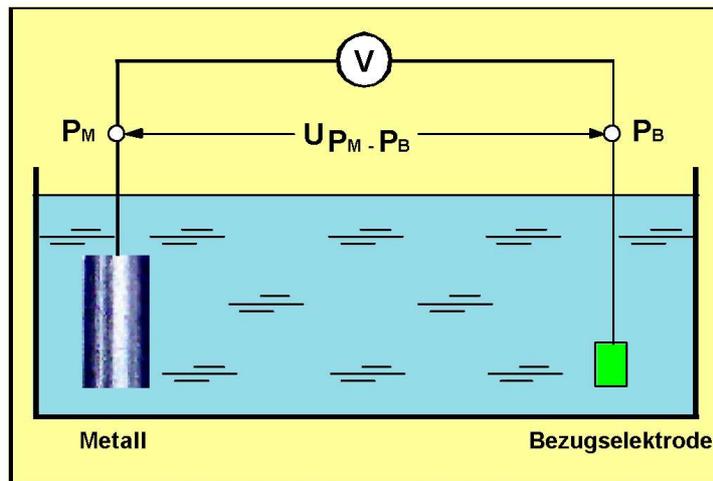
Zur Beurteilung der kathodischen Schutzwirkung in der Praxis ist das Potential des Schutzobjekts gegen eine Bezugelektrode als Kriterium am gebräuchlichsten. Die Durchführung der Potentialmessungen und die Beurteilung der gefundenen Potentialwerte sind jedoch nicht ganz unproblematisch.

### 7.2.1 Potential Metall / Elektrolyt

#### 7.2.1.1 Definition eines Potentials

Metalle, die in einen Elektrolyten eintauchen, bauen eine elektrische Ladung gegenüber dem Elektrolyten auf, die Potential genannt wird. Da wohl das Metall, nicht aber der Elektrolyt, an ein Messinstrument angeschlossen werden kann, ist ein Potential (so genanntes Einzelpotential) nicht direkt messbar. Es kann nur mit einem bekannten Potential, welches eine mit dem zweiten Pol des Messinstruments verbundene Bezugelektrode liefert, verglichen werden.

Die Differenz zwischen dem unbekanntem Potential des Schutzobjekts und dem bekannten Potential der Bezugelektrode ist als Spannung an einem Messinstrument ablesbar (s. Abb. 7.2). Diese Spannung wird in der Praxis als „Potential“ bezeichnet.



**Abb. 7.2:** Schema einer ursprünglichen Potentialmessung

$$U = P_M - P_B \text{ [mV]}$$

Gl. 7.1)

U = Messwert

P<sub>M</sub> = Potential des Schutzobjektes

P<sub>B</sub> = Potential der Bezugselektrode

### 7.2.1.2 Freies Korrosionspotential ( $U_R$ )

Ohne den Einfluss äußerer Stromquellen (wie Streuströme, Schutzströme, Elementströme) stellt sich am Stahlbauwerk ein freies Korrosionspotential ein. Dieses liegt bei den verschiedenen metallischen Werkstoffen und den natürlich vorkommenden Elektrolyten in einem jeweils charakteristischen Bereich. Bei Gusseisen und Baustählen stellt es sich zwischen ca. -550 bis ca. -750 mV, bezogen auf die Kupfer/Kupfersulfat-Bezugselektrode, ein (s. Abschn. 7.2.2 und 7.2.3).

In der Praxis werden an stählernen Bauwerken häufig freie Korrosionspotentiale in folgenden Bereichen gefunden:

- In Böden und Süßwässern: - 550 bis - 650 mV/Cu<sup>1</sup>
- In Brack- und Meerwässern: - 650 bis - 720 mV/Cu
- In anaeroben (sauerstoffarmen, bindigen) Bodenschichten: - 720 bis -800 mV/Cu

Die Größe der freien Korrosionspotentiale wird beeinflusst durch eine Vielzahl von Parametern, wie z. B. Elektrolytzusammensetzung und -konzentration, Temperatur, Sauerstoffkonzentration, Deckschichtenbildung usw. Deshalb sind diese Potentiale kein ausreichendes Kriterium für Korrosionsgefährdungen oder Korrosionsgeschwindigkeiten.

Korrosionspotentiale tendieren mehr zu positiveren Werten, wenn die Stahloberflächen mit Korrosionsprodukten bedeckt sind oder Sauerstoff an sie herantreten kann. Sind die Oberflächen blank bzw. frisch eingebettet oder der Sauerstoffzutritt gehemmt, tendieren die Potentiale mehr zu negativeren Werten.

### 7.2.1.3 Einschaltpotential ( $U_E$ )

Unter dem Einfluss äußerer Stromquellen verschieben sich die Potentiale in positiver oder negativer Richtung je nach Stromfluss aus den oder in die Stahlflächen. Nur unter diesen Einflüssen sind die Korrosionspotentiale als Kriterien für Korrosionsgefährdungen (u. U. auch für Korrosionsgeschwindigkeiten) heranziehbar:

Dieser Strom durchquert den Elektrolytraum, der sich zwischen der Bezugselektrode und der zu messenden Fläche befindet. Dieser Raum stellt einen elektrischen Widerstand dar, der sich aus dem Elektrolytwiderstand und dem Widerstand der Deckschichten auf dem Schutzobjekt zusammensetzt.

---

<sup>1</sup> Das Kürzel .../Cu bedeutet: Gemessen gegen Kupfer/Kupfersulfat-Bezugselektrode (Cu/CuSO<sub>4 ges</sub>).

Nach dem Ohmschen Gesetz verursacht ein Stromfluss durch einen Widerstand eine Spannung (Spannungsfall):

$$U_E = I \cdot R_E \text{ [V]} \quad \text{Gl. 7.2)}$$

$U_E$  = Spannungsfall im Elektrolyten [V]

$I$  = Strom [A]

$R_E$  = Widerstand des Elektrolyten [ $\Omega$ ]

Der ( $I \cdot R$ )-Anteil ist bei nicht beschichteten Bauwerken in reinem Meerwasser immer vernachlässigbar gering.

Dieser Spannungsfall geht bei Messung an eingeschalteten Schutzanlagen als Fehler in den abgelesenen Messwert ein, der zu negativeren Werten hin verschoben wird als tatsächlich vorhanden (s. Abb. 7.3):

$$U = P_M + (I \cdot R) - P_B \text{ [mV]} \quad \text{Gl. 7.3)}$$

$U_1$  = Messwert bei geringer Distanz Kathode/Bezugselektrode

$U_2$  = Messwert bei erhöhter Distanz Kathode/Bezugselektrode

$K$  = Kathode

$B_{1/2}$  = Bezugselektroden

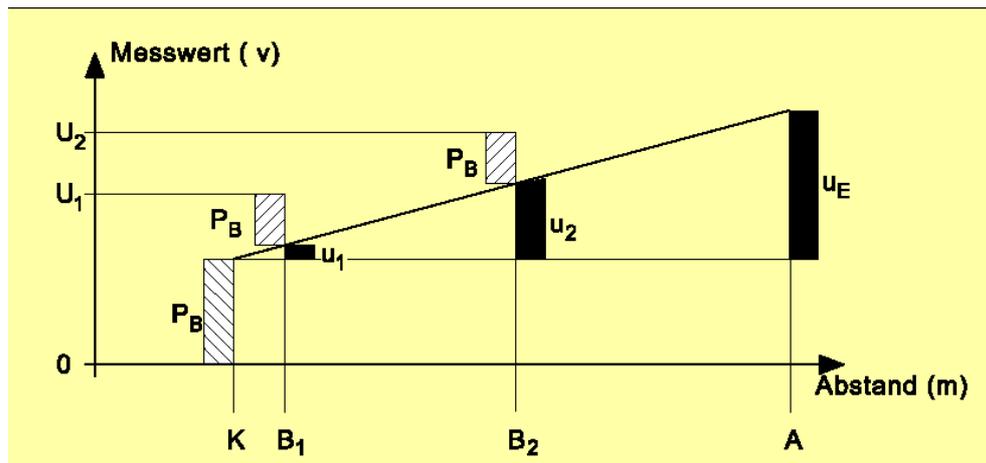
$A$  = Anode

$P_M$  = zu messendes Potential der Kathode

$P_B$  = konstantes Potential der Bezugselektrode

$U_{1/2}$  = Spannungsfall ( $I \cdot R$ ) zwischen Kathode und Bezugselektrode

$U_E$  = Spannungsfall im Elektrolyten zwischen Kathode und Anode



**Abb. 7.3:** Einfluss des Spannungsfalls auf die Potentialmessung

Es sind zwar Methoden bekannt, unter Stromfluss den  $(I \cdot R)$ -Anteil im Messwerk zu kompensieren, zu bestimmen oder vernachlässigbar klein zu halten, jedoch sind sie bei vertretbarem Aufwand nur unter Laborbedingungen und nicht in der Praxis anwendbar.

Bei Fremdstrom-Schutzanlagen kann der  $(I \cdot R)$ -Anteil der Potentialmessung stark unterschiedliche Beträge annehmen, z. B.:

- a) um mehrere 1,0 mV:  
geringer Abstand Messsonde/ Kathode, großer Abstand Messsonde/  
Anode, hohe Leitfähigkeit des Elektrolyten (Meerwasser), blanke Kathode.

In diesem Fall kann auf Berücksichtigung des  $(I \cdot R)$ -Anteils verzichtet werden.

- b) um mehrere 100 mV:  
großer Abstand Messsonde/ Kathode, geringer Abstand Messsonde/  
Anode, niedrige Leitfähigkeit des Elektrolyten (Süßwasser), beschichtete  
Kathode.

Das bedeutet, dass sich der  $(I \cdot R)$ -Anteil zwischen vernachlässigbar geringen Werten und dem Mehrfachen des möglichen Potentialwertes bewegen kann, je nach Position der Messsonde und den örtlichen Verhältnissen.

Zur Ausschaltung dieser Einflüsse muss im Falle b)  $(I \cdot R)$  frei gemessen werden (s. Abschnitt 7.2.6).

#### **7.2.1.4 Phasengrenzpotential ( $U_x$ )**

Unter dem Phasengrenzpotential versteht man das Potential des Schutzobjektes an der Phasengrenzfläche Metall/Elektrolyt, wie z.B. direkt an der Grenzfläche Stahlbauwerk/Beschichtung, Stahlbauwerk/Seewasser oder Stahlbauwerk/Erdreich.

Dieses Phasengrenzpotential kann jedoch in der Praxis nicht direkt gemessen werden. Man misst in der Praxis daher das so genannte Ausschaltpotential, welches näherungsweise als Phasengrenzpotential betrachtet wird.

Die Messweise wird im Abschnitt 7.2.1.6 weiter unten beschrieben.

#### **7.2.1.5 Mischpotentiale**

Unter dem Einfluss äußerer Stromquellen verschieben sich die Potentiale (freie Korrosionspotentiale s. 7.2.1.2) in positiver oder negativer Richtung je nach Stromfluss aus den oder in die Stahlflächen. Nur unter diesen Einflüssen sind die Korrosionspotentiale als Kriterien für Korrosionsgefährdungen (u. U. auch für Korrosionsgeschwindigkeiten) heranziehbar:

Eine Verschiebung der Potentiale in positiver Richtung bedeutet eine Erhöhung der Korrosionsgeschwindigkeit, z. B. bei  $-400 \text{ mV/Cu}$  = mittelstarke Gefährdung des Stahls, d.h. die anodische Teilreaktion vergrößert sich, es gehen mehr Metallionen in Lösung.

Eine Verschiebung der Potentiale in negativer Richtung bedeutet eine Verlangsamung der Korrosionsgeschwindigkeit, z. B. bei - 800 mV/Cu = sehr schwache Gefährdung des Stahls, d.h. die anodische Teilreaktion verringert sich, es gehen weniger Metallionen in Lösung.

#### 7.2.1.6 Schutzpotential ( $U_V$ )/ Ausschaltpotential ( $U_A$ ) - ( $I \cdot R$ ) frei

Wird das Potential, z. B. durch Schutzstrom genügend weit in negativer Richtung verschoben, d.h. bis hin zu Werten von gleich oder negativer -850 mV/Cu, nähert sich die Korrosionsgeschwindigkeit dem Wert Null und die kathodische Schutzwirkung für übliche Baustähle ist erreicht. Der Grenzwert von - 850 mV/Cu wird als kathodisches Schutzpotential bezeichnet.

Bei Anwesenheit sulfatreduzierender oder nitratreduzierender Bakterien (SRB, NRB) in anaeroben Elektrolyten muss das Schutzpotential um mindestens weitere 100 mV auf -950 mV/Cu abgesenkt werden. Gleiches gilt in aneroben Elektrolyten bei Anwesenheit von Eisenbakterien und schwefeloxidierenden oder thiosulfatoxidierenden Bakterien (SOB).

Da die genannten Bakteriengruppen weit verbreitet sind, empfiehlt es sich, in schlickhaltigen Böden das Betriebspotential von Schutzanlagen mit -950 mV/Cu anzusetzen.

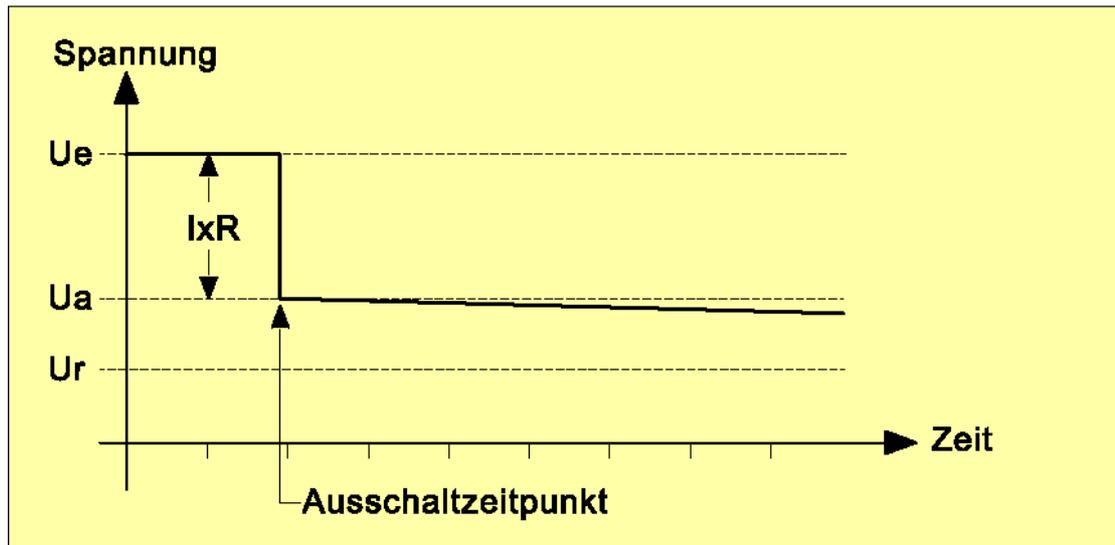
Die Messung des IR-freien Potentials geschieht bei Fremdstromanlagen in einfacher Weise durch Anwendung der so genannten Ein-/Ausschalt-Methode. Dabei wird während der Ablesung des Potentialwertes der Schutzstrom kurzzeitig ausgeschaltet. Im Augenblick der Ablesung ist dann  $I = 0$  und nach der Beziehung

$$U = I \cdot R \text{ [V]}$$

**Gl. 7.4)**

wird der verfälschende Spannungsfall ebenfalls Null.

Diese Messmethode basiert darauf, dass bei Ausschaltung des Schutzstroms der ( $I \cdot R$ )-Anteil, die sogenannte Widerstandspolarisation, praktisch augenblicklich zusammenbricht, während dagegen die elektrochemische Polarisation wesentlich langsamer abklingt. Deshalb können kurz nach Ausschaltung des Schutzstroms die „echten“ Potentialwerte weitgehend verfälschungsfrei gemessen werden. Das Diagramm in Abb. 7.4 zeigt in vereinfachter Darstellung den zeitlichen Verlauf der Potentiale im eingeschalteten Zustand und nach dem Abschalten.



**Abb. 7.4:** Zeitliches Verhalten von Spannungsfall und Polarisation

Das Einschaltpotential ( $U_e$ ) fällt umgehend um den Betrag ( $I \cdot R$ ) auf das Ausschaltpotential ( $U_a$ ) ab, das sich bei andauernder Ausschaltung langsam dem freien Korrosionspotential ( $U_r$ ) nähert. Innerhalb eines Zeitraums von bis zu 2 Sekunden bei geringer bzw. 10 Sekunden bei guter Deckschichtenpolarisation lassen sich die Ausschaltpotentiale mit genügender Genauigkeit ablesen.

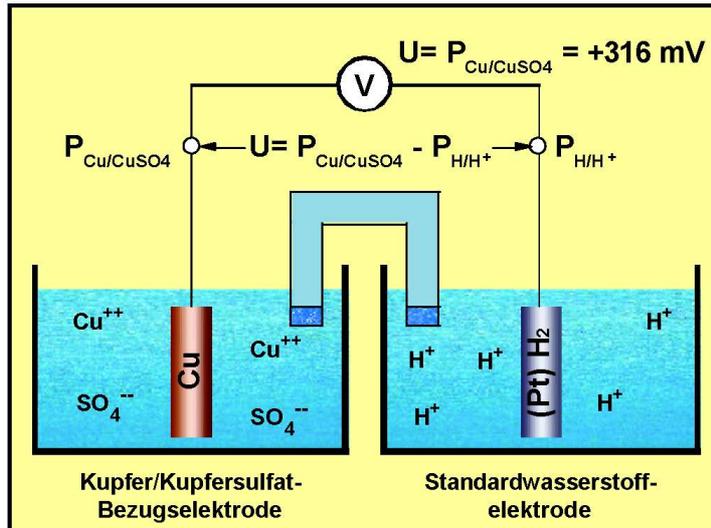
Das Verhältnis Einschaltzeit/Ausschaltzeit soll groß sein und mindestens vier zu eins betragen.

In Sonderfällen und für orientierende Betriebskontrollen ist es möglich, an anodenfernen Stellen die Einschaltpotentiale zu messen. Dabei muss aber vorher bekannt sein, dass an den Messpunkten entweder der ( $I \cdot R$ )-Anteil vernachlässigbar gering ist oder aber bei Erreichen oder Überschreitung bestimmter Einschaltpotentiale mit Sicherheit genügend hohe Schutzpotentiale vorhanden sind. Diese Vorbedingungen müssen von Zeit zu Zeit überprüft werden.

## 7.2.2 Bezugselektroden (Referenzelektroden)

### 7.2.2.1 Definition

Bezugselektroden sind elektrochemische Halbzellen. Sie bestehen aus einem Metall, das in eine bestimmte Lösung seiner Metallionen eintaucht. Dabei bildet sich ein definiertes, reproduzierbares und konstantes Potential, das so genannte „Bezugspotential“ (s. Abb. 7.5).



**Abb. 7.5:** Schema der Bezugspotentialmessung

Bei Potentialmessungen sollten die Messwerte, um Verwechslungen vorzubeugen, immer in Millivolt [mV] abgelesen und protokolliert werden. Absolut erforderlich ist die Angabe des Vorzeichens und des Zusatzes die Bezugselektrode betreffend. Ohne diese Angaben sind Fehlinterpretationen möglich.

### 7.2.2.2 Anforderungen

An eine Bezugselektrode werden folgende Anforderungen gestellt:

- sie muss weitgehend unpolarisierbar sein
- sie muss möglichst rasch und reversibel ein Gleichgewichtspotential mit dem Elektrolyt (Boden/Wasser) einstellen
- sie muss möglichst wenig empfindlich gegen chemische Verunreinigung und Konzentrationsänderung sein
- als Dauerbezugselektrode muss sie möglichst langzeitstabil sein

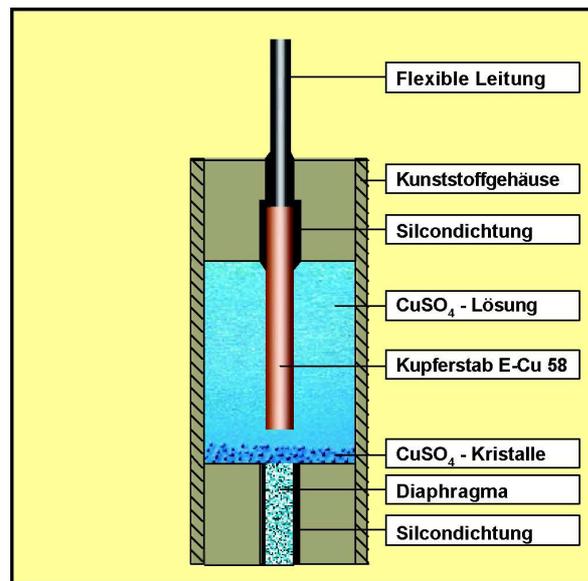
### 7.2.2.3 Elektrodenarten / Bauformen

Der Potentialwert Null ist willkürlich der Standard-Wasserstoff-Elektrode zugeordnet. Die Bezugspotentiale aller anderen Elektrodentypen werden auf diese Elektrode bezogen, sind also positiver oder negativer als diese.

Mit der Standard-Wasserstoff-Elektrode gemessene Potentiale werden mit „mV/H“ gekennzeichnet, z. B. -534 mV/H für das kathodische Schutzpotential entsprechend -850 mV/ Cu.

### Gesättigte Kupfer/ Kupfersulfat-Elektrode

In der Korrosionsschutzpraxis werden die Potentiale häufig auf die Cu/CuSO<sub>4</sub>(ges)-Elektrode bezogen (s. Abb. 7.6). Sie besteht aus einem Kupferstab, der in eine Kupfersulfatlösung eintaucht. Die Lösung muss „gesättigt“, d.h. es muss ein Bodensatz von ungelösten Kupfersulfat-Kristallen (CuSO<sub>4</sub> · 5 H<sub>2</sub>O) in der konzentrierten Lösung vorhanden sein. Das Eigenpotential beträgt unter diesen Bedingungen +316 mV/H (s. Abb. 7.5). Die Messwerte werden mit „mV/Cu“ bezeichnet, z. B. -850 mV/Cu für das kathodische Schutzpotential.



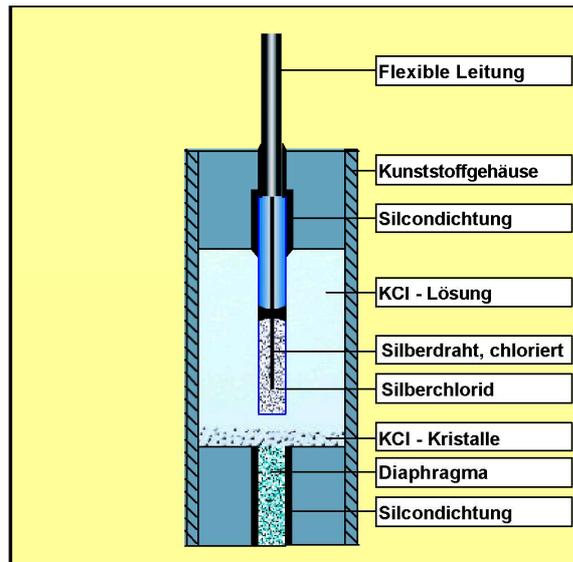
**Abb. 7.6:** Kupfer/Kupfersulfat-Bezugselektrode

Speziell in chloridhaltigen Elektrolyten wie Brack- und Meerwässern wird die Cu/CuSO<sub>4</sub>-Elektrode leicht durch eindringende Chloride „vergiftet“. Der daraus folgende Messfehler kann bis zu 150 mV betragen.

### Gesättigte Silber/Silberchlorid-Elektrode

Im Meerwasser und andere Chloride enthaltenden Elektrolyten ist die Ag/AgCl-Elektrode besser geeignet. Sie besteht aus einem mit festem Silberchlorid (AgCl) beschichteten Silberstab, der in eine gesättigte Kaliumchlorid-Lösung (KCl) eintaucht (s. Abb. 7.7). Das Bezugspotential beträgt + 196 mV/H. Die Messwerte werden mit „mV/Ag“ bezeichnet, z. B. - 730 mV/Ag für das kathodische Schutzpotential.

Vorsicht: Werden Ag/AgCl-Elektroden in Laborausführung benutzt, kann es sich um Typen handeln, die nicht mit gesättigter KCl-Lösung, sondern mit Lösungen bestimmter anderer Konzentration (3,5 bzw. 1 oder 0,1 molar) gefüllt sind. Diese besitzen andere Bezugspotentiale (s. Abschn. 7.2.3).



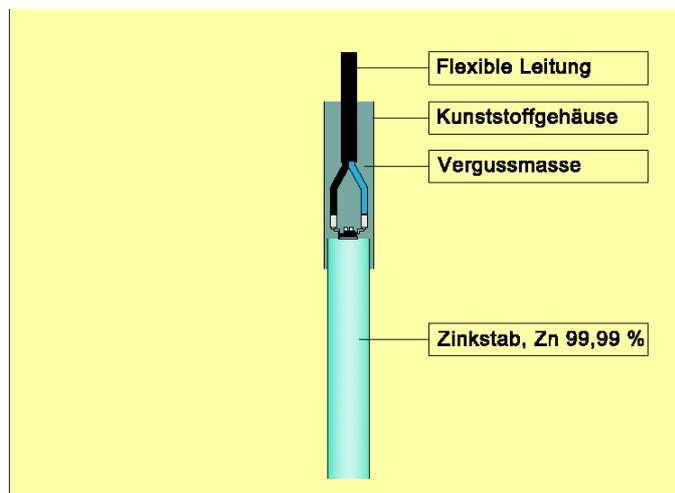
**Abb. 7.7:** Silber/Silberchlorid-KCl (ges)-Bezugselektrode

### Zink-Elektrode

Die vielfach gebräuchliche Zink-Elektrode ist keine echte Bezugselektrode, da sie nicht als definierte Halbzelle aufgebaut ist. Stattdessen wird nur ein Zinkstab aus Reinzink oder Zinkanoden-Legierung direkt in das Wasser eingetaucht (s. Abb. 7.8). Damit befindet sich diese Elektrode in einem undefinierten Elektrolyten und die Potentiale sind über einen gewissen Bereich ungenau ( $\pm 25$  mV!). Ferner ist eine derartige Elektrode sauerstoffsensitiv, d. h. sie reagiert auf Änderungen der Sauerstoffkonzentration mit entsprechenden Bezugspotentialänderungen.

Die Zinkelektrode ist für genaue Messungen nicht brauchbar. Wegen ihrer Robustheit eignet sie sich jedoch als Dauerelektrode für orientierende Betriebskontrollen und als Steuersonde für automatische Schutzstromgeräte.

Das Bezugspotential dieser Elektrode liegt bei ca.  $-770 \pm 25$  mV/H. Die Messwerte werden mit „mV/Zn“ bezeichnet, z. B. ca.  $+236$  mV/Zn für das kathodische Schutzpotential.



**Abb. 7.8:** Zinkelektrode

### 7.2.3 Potentialbereiche von Bezugs Elektroden

Die Tabellen 7.1 und 7.2 zeigen die wichtigsten Potentiale und Potentialbereiche bei den gebräuchlichsten Bezugs Elektroden. Da in der wissenschaftlichen Literatur vorwiegend auf die Standardwasserstoffelektrode bezogen wird, wurden die entsprechenden Werte in die Tafeln aufgenommen.

Potentialkriterium	Bezugs Elektroden-Type			
	[mV/Cu]	[mV/Ag]	[mV/Zn]*	[mV/H]
Bereich des Korrosionspotentials	-550 ... -750	-430 ... -630	+536 ... +336	+236 ... <b>+436</b>
Schutzpotential Grenzwert 1**	-850	-730	+236	-536
Schutzpotential Grenzwert 2***	-950	-830	+136	-636
Optimaler **** Potentialbereich	-950 ... -1000	-830 ... -930	+136 ... +36	-636 ... -736
Obergrenze bei Beschichtungen	-1150	-1030	-64	-834
Wasserstoffentwicklung	-1250	-1130	-164	-934

**Tabelle 7.1:** Potentialbereiche der gebräuchlichsten Bezugs Elektroden

- \* Unsicherheit Zinkelektrode:  $\pm 25$  mV; \*\* Unter normalen Korrosionsbedingungen in Wässern  
 \*\*\* Schlick, anaerobe Bedingungen, Mikrobiell Induzierte Korrosion (MIC)  
 \*\*\*\* zur frühzeitigen Bildung von Deckschichten (Senkung der Stromkosten).

[mV/Cu] = Elektroden-Type Cu/CuSO<sub>4</sub> (gesättigt) Kupfer/Kupfersulfat-Elektrode

[mV/Ag] = Elektroden-Type Ag/AgCl-KCl (gesättigt) Silber/Silberchlorid-Elektrode

[mV/Zn] = Elektroden-Type Zn-Metall Zink-Elektrode; [mV/H] = Standard-Wasserstoff-Elektrode

Elektroden-Type	Bezugspotential (P <sub>B</sub> ) [mV/H]
<b>In der Praxis übliche Typen:</b> Kupfer/Kupfersulfat (ges.) Silber/Silberchlorid-KCl (ges.) Zink-Metall-Elektrode	+316 +196 -770 $\pm 25$
<b>Labor-Typen:</b> Silber/Silberchlorid-KCl (3,5 molar) Silber/Silberchlorid-KCl (1 molar) Silber/Silberchlorid-KCl (0,1 molar) Kalomel (ges.) Kalomel (1 molar) Kalomel (0,1 molar) Thalamid®	+200 +237 +289 +245 +283 +355 -568
<b>Seltene Typen:</b> Zink/Zinksulfat (ges.) Blei/Bleichlorid (ges.)	-766 -184

**Tabelle 7.2:** Potentiale von Bezugs Elektroden gegen die Wasserstoffelektrode [mV/H]

Aus den Potentialen der Bezugselektroden ( $P_B$ ) in Tabelle 7.2 und den mV/H-Werten in Tabelle 7.1 lassen sich die Potentialkriterien für die hier aufgeführten Typen errechnen:

Beispiel:

Schutzpotential für Silber/Silberchlorid-KCl (0,1 molar);

$P_B$  - Schutzpotential [mV/H] = Potential [mV/Ag (0,1 molar)]

= + 289 - (-534) = + 823 mV bei Vorzeichen Elektrode bzw.

= - 823 mV bei Vorzeichen Bauwerk

#### 7.2.4 Messgeräte

Als Messinstrument für Potentialmessungen ist jedes Gleichstromvoltmeter geeignet, das einen Eingangswiderstand ( $R_i$ ) von mindestens 1 M $\Omega$  hat. Besser sind 10 bis 100 M $\Omega$ . Moderne Geräte mit elektronischem Verstärker erfüllen leicht diese Bedingung. Die Ansprechzeit für den Zeigerausschlag zwischen Null und Vollausschlag sollte nicht mehr als 1 Sekunde betragen. Digitalvoltmeter sind bei stärker schwankenden Werten sehr schwer ablesbar und nur in Ausnahmefällen zu verwenden.

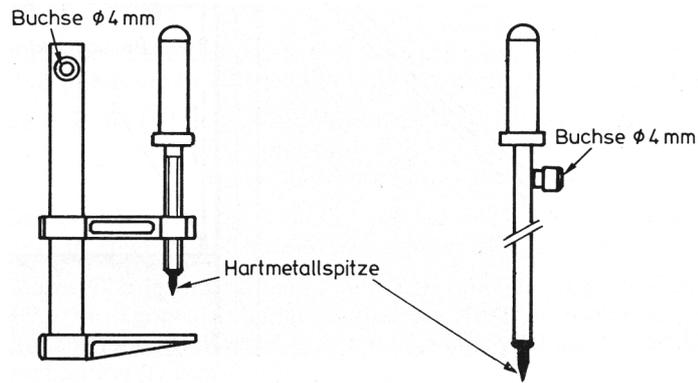
Das Messinstrument sollte netzunabhängig betrieben werden können. In Ausnahmefällen einsetzbare netzabhängige Geräte müssen für Messungen an geerdeten Objekten geeignet sein. Da überlagerte Wechselspannungen bei Potentialmessungen häufig vorhanden sind, sollte das verwendete Instrument eine möglichst hohe Wechselspannungsunterdrückung besitzen.

#### 7.2.5 Messtechnischer Aufbau

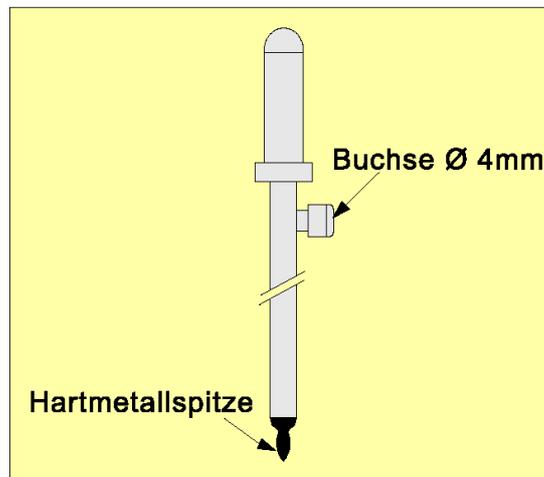
Die Bezugselektroden („Messsonden“) können entweder selbst hergestellt oder in geeigneter Ausführung über Spezialfirmen für kathodischen Korrosionsschutz bezogen werden. Das Anschlusskabel für die unter Wasser verwendbaren Typen muss mechanisch robust und absolut wasserdicht angeschlossen sein.

Speziell für den Korrosionsschutz geeignete Bezugselektroden haben ein niederohmiges Diaphragma und lassen sich öffnen, um die Füllung überprüfen oder erneuern zu können. Laborausführungen sind in der Regel nicht zweckmäßig, da sie zu empfindlich und/oder für den Einsatz unter Wasser ungeeignet sind.

Für den Minusanschluss am Schutzobjekt ist je nach Bauwerk eine kräftige Klemme oder ein Spieß mit Hartmetallspitze erforderlich (s. Abb. 7.9 bzw. 7.10). Das zu messende Bauwerk muss sich damit elektronenleitend über metallisch blanke Kontakte anschließen lassen. Rost- und Anstrichschichten stören dabei und müssen entfernt oder durchstoßen werden.



**Abb. 7.9:** Kontaktklemme



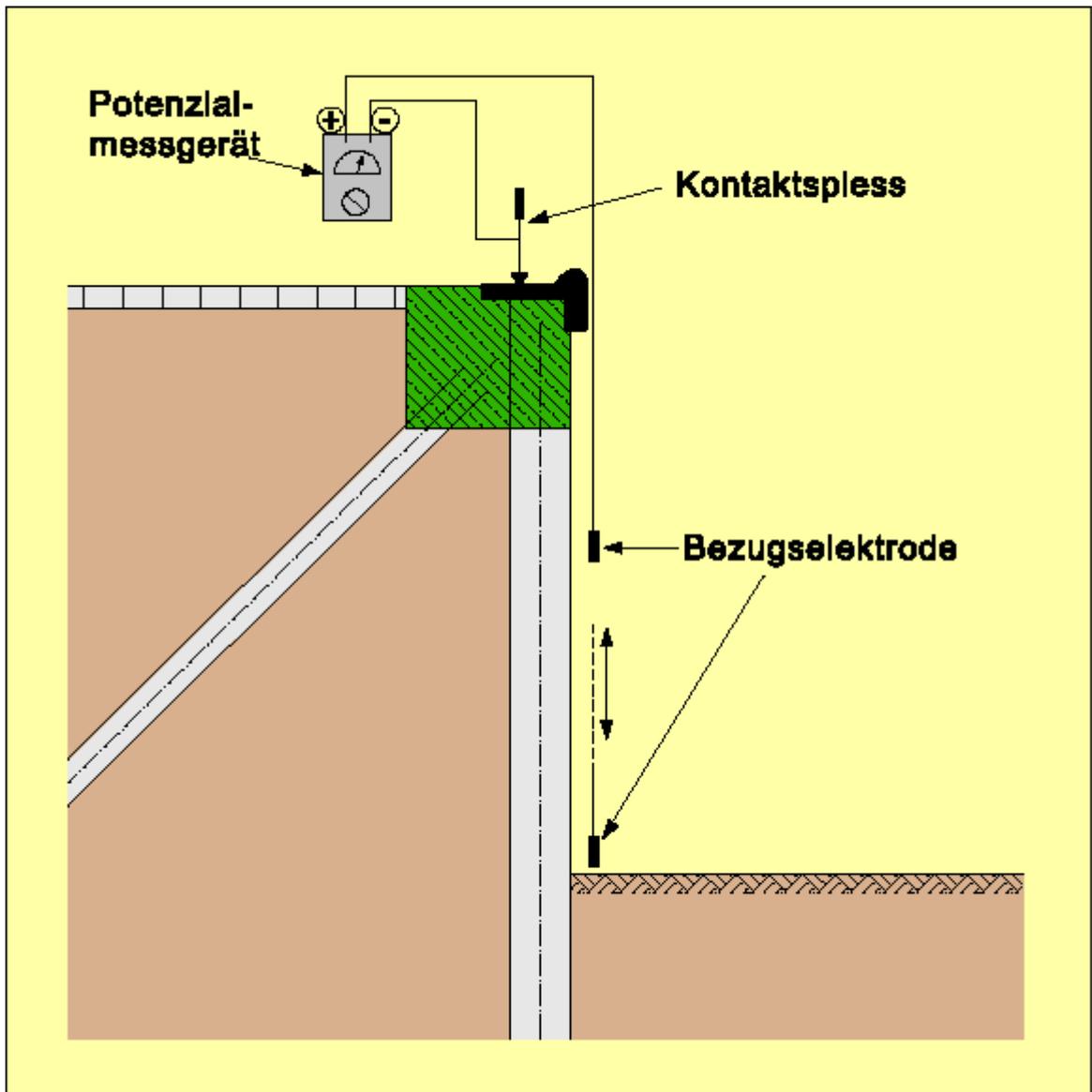
**Abb. 7.10:** Kontaktspieß

Zur Messung mit unipolaren Messgeräten werden der Pluspol des Voltmeters mit der Bezugselektrode und der Minuspol mit dem Bauwerk verbunden. Auf die richtige Polung ist unbedingt zu achten, da das zum Messwert gehörende Vorzeichen immer bekannt sein muss (s. Abschn. 7.2.2).

Achtung: Zinkelektrode hat umgekehrte Polung und wechselt bei  $-1086 \text{ mV/Cu}$ .

Das Vorzeichen wird immer bezogen auf das Schutzobjekt angegeben.

Während der Messung soll sich die Bezugselektrode möglichst nahe der Objektflächen befinden (s. Abb. 7.11). Die Messung bezieht sich näherungsweise auf einen Oberflächenbereich, dessen Mittelpunkt der Elektrode gegenüber liegt und dessen Durchmesser dem Elektrodenabstand entspricht. In diesem Bereich wird der Mittelwert, das „Mischpotential“ aus allen hierin vorhandenen Potentialwerten erfasst. Damit sinkt mit steigendem Elektrodenabstand die Aussagekraft der Messung!



**Abb. 7.11:** Potentialmessung am Schutzobjekt

Es muss gewährleistet sein, dass sich zwischen dem Minuskontakt und dem zu messenden Teil keine elektrolytische Verbindung aus z. B. Beton oder Rostschichten befindet. Hierdurch würden in Wirklichkeit nicht vorhandene, stark negative Potentiale vorgetäuscht.

## 7.2.6 Maßnahmen zur Durchführung der Messungen

### 7.2.6.1 Festlegung von Messpunkten

Um Potentialmessungen miteinander vergleichen und trendmäßig auswerten zu können, muss ein Messstellenplan aufgestellt werden, der die anodenfernsten Bereiche bzw. die Bereiche mit den niedrigsten Potentialen und die Anoden selbst berücksichtigt. Nachfolgende Messungen sind exakt an den festgelegten Messpunkten zu wiederholen.

Der schematische Messstellenplan in Abb. 7.12 soll das Prinzip für KKS-Schutzanlagen an Spundwandbauwerken verdeutlichen. Es kann für andere Bauwerke sinngemäß abgewandelt werden.

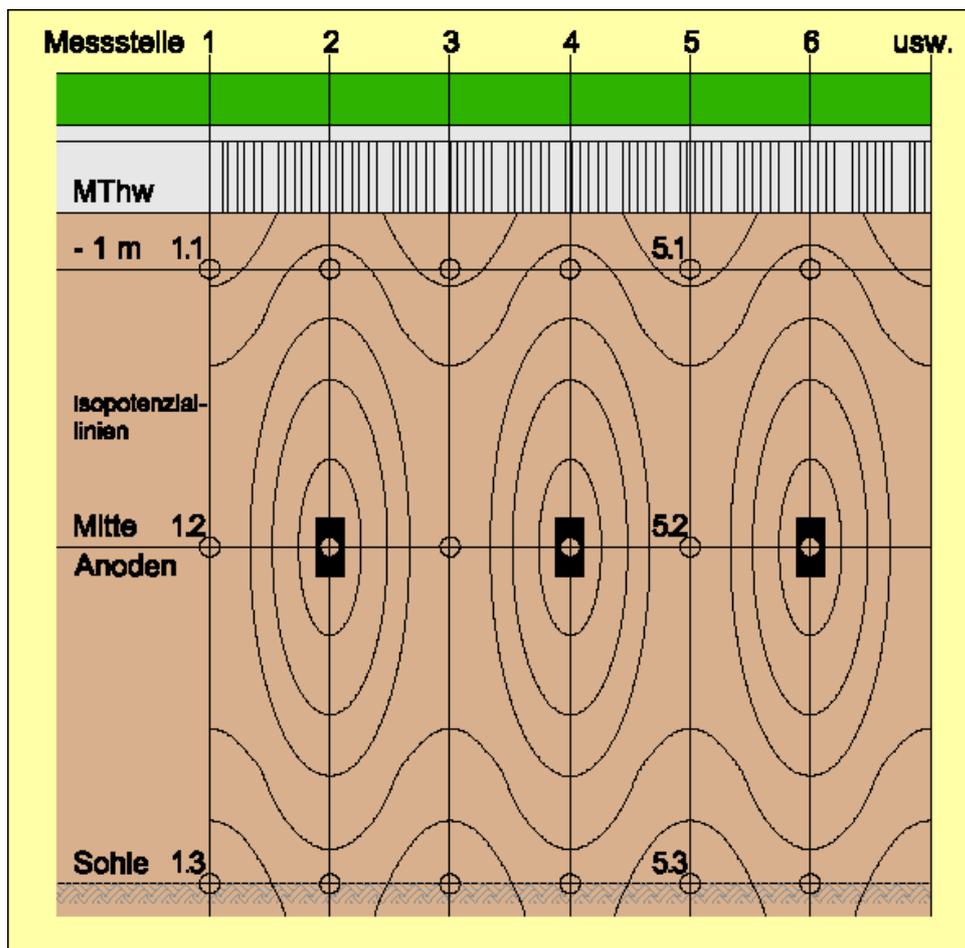


Abb. 7.12: Messstellenplan

### 7.2.6.2 Vorbereitende Maßnahmen

Vor der Durchführung der Messungen sind die Betreiber zu informieren.

Bei Fremdstromanlagen sind die auf den Messbereich wirkenden Schutzstromgeräte in den Taktmodus (z.B. 12 Sek. EIN, 3 Sek. AUS) zu bringen. Dies kann durch den Einsatz von eingebauten Schaltuhren oder durch den Anschluss von externen Schaltuhren erfolgen. Dabei ist darauf zu achten, dass alle beteiligten Schutzstromgeräte synchron getaktet werden, um Fehlmessungen zu vermeiden.

Bei Messungen in einem EX-Bereich (=explosionsschutz) ist zusätzlich vor der Durchführung der Messungen eine Erlaubnis einzuholen und die geltenden Vorschriften für das Arbeiten in explosionsgefährdeten Bereichen sind zu beachten.

### 7.2.6.3 IR-freie Potentialmessung s. weiter oben (Abbildungen, etc...)

Wie aus den Abschn. 7.2.1 und 7.2.2 hervorgeht, wird der Potentialwert durch die Differenz zwischen dem unbekanntem Potential des Bauwerks und dem Konstantpotential der Bezugselektrode gebildet:

$$U = P_M - P_B \text{ [mV]} \qquad \text{Gl. 7.5)}$$

U = Messwert

P<sub>M</sub> = Potential des Bauwerks [mV]

P<sub>B</sub> = Potential der Bezugselektrode [mV]

Das gilt jedoch nur, wenn keine äußeren Stromquellen auf das Bauwerk einwirken. Das wäre z. B. der Fall bei der Messung ungestörter, freier Korrosionspotentiale.

Bei der Kontrolle von kathodischen Schutzanlagen ist dieses Prinzip aber unterbrochen, weil der kathodische Schutzstrom fließt.

Dieser Strom durchquert den Elektrolytraum, der sich zwischen der Bezugselektrode und der zu messenden Fläche befindet. Dieser Raum stellt einen elektrischen Widerstand dar, der sich aus dem Elektrolytwiderstand und dem Widerstand der Deckschichten auf dem Schutzobjekt zusammensetzt.

Nach dem Ohmschen Gesetz verursacht ein Stromfluss durch einen Widerstand eine Spannung (Spannungsfall):

$$U_E = I \cdot R_E \text{ [V]} \qquad \text{Gl. 7.6)}$$

U<sub>E</sub> = Spannungsfall im Elektrolyten [V]

I = Strom [A]

R<sub>E</sub> = Widerstand des Elektrolyten [Ω]

Dieser Spannungsfall geht bei Messung an eingeschalteten Schutzanlagen als Fehler in den abgelesenen Messwert ein, der zu negativeren Werten hin verschoben wird als tatsächlich vorhanden (s. Abb. 7.13):

$$U = P_M + (I \cdot R) - P_B \text{ [mV]}$$

**Gl. 7.7)**

$U_1$  = Messwert bei geringer Distanz Kathode/Bezugselektrode

$U_2$  = Messwert bei erhöhter Distanz Kathode/Bezugselektrode

K = Kathode

$B_1 / B_2$  = Bezugselektroden

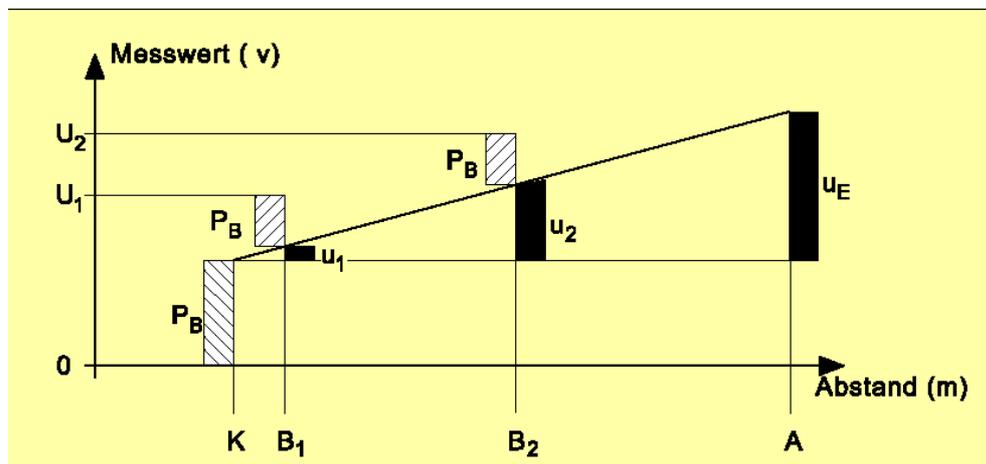
A = Anode

$P_M$  = zu messendes Potential der Kathode

$P_B$  = konstantes Potential der Bezugselektrode

$U_1 / U_2$  = Spannungsfall ( $I \cdot R$ ) zwischen Kathode und Bezugselektrode

$U_E$  = Spannungsfall im Elektrolyten zwischen Kathode und Anode



**Abb. 7.13:** Einfluss des Spannungsfalls auf die Potentialmessung

Bei Fremdstrom-Schutzanlagen kann der ( $I \cdot R$ )-Anteil im Potentialmesswert stark unterschiedliche Beträge annehmen, z. B.:

a) um mehrere 1,0 mV:

geringer Abstand Messsonde/ Kathode, großer Abstand Messsonde/Anode, hohe Leitfähigkeit des Elektrolyten (Meerwasser), blanke Kathode.

In diesem Fall kann auf Berücksichtigung des ( $I \cdot R$ )-Anteils verzichtet werden.

b) um mehrere 100 mV:

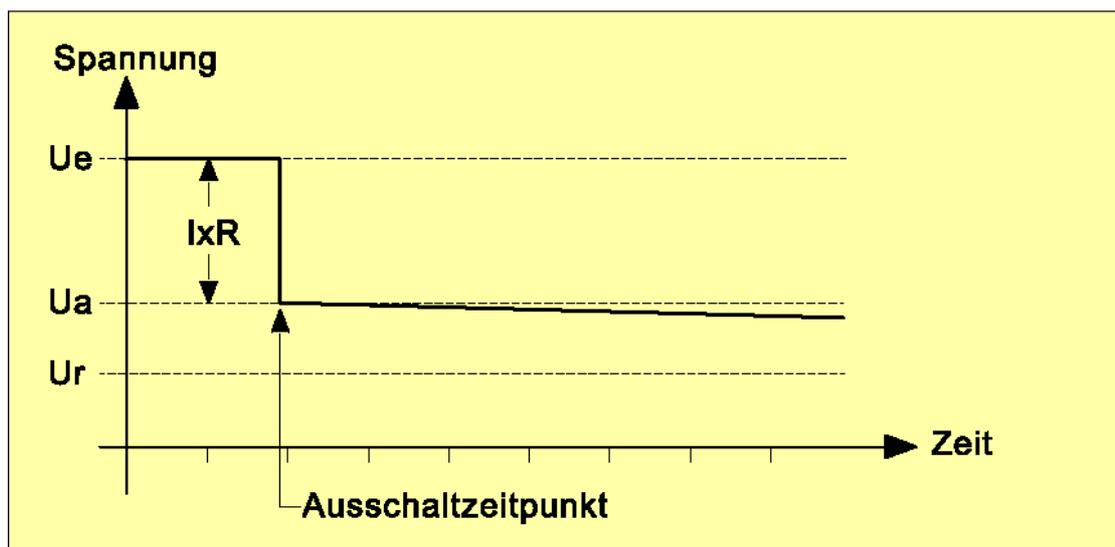
großer Abstand Messsonde/ Kathode, geringer Abstand Messsonde/ Anode, niedrige Leitfähigkeit des Elektrolyten (Süßwasser), beschichtete Kathode.

Das bedeutet, dass sich der  $(I \cdot R)$ -Anteil zwischen vernachlässigbar geringen Werten und dem Mehrfachen des möglichen Potentialwertes bewegen kann, je nach Position der Messsonde und den örtlichen Verhältnissen.

Es sind zwar Methoden bekannt, unter Stromfluss den  $(I \cdot R)$  Anteil im Messwerk zu kompensieren, zu bestimmen oder vernachlässigbar klein zu halten, sie sind aber bei vertretbarem Aufwand nur unter Laborbedingungen und nicht in der Praxis anwendbar.

Zur Ausschaltung dieser Einflüsse muss daher  $(I \cdot R)$  frei gemessen werden. Das geschieht bei Fremdstromanlagen in einfacher Weise durch Anwendung der so genannten Ein-/Ausschalt-Methode. Dabei wird während der Ablesung des Potentialwertes der Schutzstrom kurzzeitig ausgeschaltet. Im Augenblick der Ablesung ist dann  $I = 0$  und nach der Beziehung  $U = I \cdot R$  [V] wird der verfälschende Spannungsfall ebenfalls Null

Diese Meßmethode basiert darauf, dass bei Ausschaltung des Schutzstroms der  $(I \cdot R)$ -Anteil, die so genannte Widerstandspolarisation, praktisch augenblicklich zusammenbricht, während dagegen die elektrochemische Polarisation des Schutzobjektes wesentlich langsamer abklingt. Deshalb können kurz nach Ausschaltung des Schutzstroms die „echten“ Potentialwerte weitgehend verfälschungsfrei gemessen werden. Das Diagramm in Abb. 7.14 zeigt in vereinfachter Darstellung den zeitlichen Verlauf der Potentiale im eingeschalteten Zustand und nach dem Abschalten.



**Abb. 7.14:** Zeitliches Verhalten von Spannungsfall und Polarisation

Das Einschaltpotential ( $U_E$ ) geht sprunghaft um den Betrag  $(I \cdot R)$  auf das Ausschaltpotential ( $U_A$ ) zurück, das sich bei andauernder Ausschaltung langsam dem freien Korrosionspotential ( $U_R$ ) nähert. Innerhalb eines Zeitraums von bis zu 2 Sekunden bei geringer bzw. 10 Sekunden bei guter Deckschichtenpolarisation lassen sich die Potentiale mit genügender Genauigkeit ablesen.

Das Verhältnis Einschaltzeit/Ausschaltzeit soll groß sein, um den mittleren Schutzstrom auf das Bauwerk nicht unnötig zu verringern.

In Sonderfällen und für orientierende Betriebskontrollen ist es möglich, an anodenfernen Stellen die Einschaltpotentiale zu messen. Dabei muss aber vorher bekannt sein, dass an den Messpunkten entweder der (I • R)-Anteil vernachlässigbar gering ist oder aber bei Erreichen oder Überschreitung bestimmter Einschaltpotentiale mit Sicherheit genügend hohe Schutzpotentiale vorhanden sind. Diese Vorbedingungen müssen von Zeit zu Zeit überprüft werden.

Der (I • R)-Anteil ist bei nicht beschichteten Bauwerken in reinem Meerwasser immer vernachlässigbar gering.

#### **7.2.6.4 Potentialmessungen an galvanischen Schutzanlagen**

Bei Potentialmessungen an Schutzobjekten, die mit galvanischen Anoden (Opferanoden) geschützt sind, muss immer unter dem Einfluss des (I • R)-Anteils gemessen werden. Es ist aus konstruktiven Gründen in der Regel nicht möglich, den Stromfluss von galvanischen Anoden für Messzwecke zu unterbrechen, wie das bei Fremdstromanlagen durch die Ein-/Ausschaltmethode geschieht (s. Abschnitt 7.2.6.3).

Die Höhe des (I • R)-Anteils ist in jedem Fall unbekannt. Es kann nur davon ausgegangen werden, dass sie in anodenfernen Bereichen geringer und anodennah größer ist. Ferner nimmt sie mit steigender Elektrolyt-Leitfähigkeit ab.

Zudem ist der (I • R)-Anteil am geringsten, wenn sich die Bezugsselektrode sehr nahe am Schutzobjekt befindet.

Zur Beurteilung der erzielten Schutzwirkung sind deshalb bevorzugt die Messwerte heranzuziehen, die anodenfern bei kürzestem Abstand der Bezugsselektrode gemessen werden.

Beim Heranführen der Bezugsselektrode an die Anode können die Potentiale wegen der zunehmenden Intensität der Schutzströme nur negativer erscheinen, obwohl die Aussagekraft der Messwerte beim Fortschreiten in dieser Richtung abnimmt.

Trotzdem sollten auch diese Bereiche und die Anoden selbst gemessen werden, indem die Bezugsselektrode an diese Stellen herangeführt wird. Das Ansteigen des Messwerts durch den zunehmenden (I • R)-Anteil mit einem Maximum über der Anode ist ein indirekter Maßstab für das Arbeiten der Anoden. Damit ist eine Möglichkeit gegeben, die Funktion und den Verbrauch von galvanischen Anoden abzuschätzen und auf Ausfälle zu kontrollieren.

## 7.3 Strommessung

### 7.3.1 Allgemeines zur Strommessung

Stromdichten und Potentiale stehen über eine Exponentialfunktion miteinander in Zusammenhang. Durch Inter- oder Extrapolation lassen sich die Messergebnisse hinsichtlich der interessierenden Potential- oder Stromdichtebereiche auswerten.

Nach der Vorpolarisation werden unterschiedlich hohe Versuchsströme mit Haltezeiten eingestellt und aus den jeweils erzielten Potentialen und den zuzuordnenden Oberflächen die spezifischen Stromdichten errechnet.

Neben der Ermittlung der Stromdichten, die für sich allein wenig aussagen, sollte während des Versuchs die Stromverteilung bei gegebener, durchdachter Anodenanordnung untersucht werden. Ggf. ist die Anodenverteilung zu optimieren.

Die Fremdstromschutzanlagen sind in der Mehrzahl der Fälle stufenlos von Hand oder über Automatik zwischen 0 und 100 % Stromabgabe einstellbar. In Sonderfällen sind sie mit einer automatischen Potentialregelung ausgerüstet. Durch diese Möglichkeiten lässt sich die Schutzanlage auch veränderlichen Betriebsbedingungen optimal anpassen.

### 7.3.2 Messgeräte

Als Messinstrument für Potentialmessungen ist jedes Gleichstromvoltmeter geeignet, das einen Eingangswiderstand ( $R_i$ ) von mindestens 1 M $\Omega$  hat. Besser sind 10 bis 100 M $\Omega$ . Das Messinstrument sollte netzunabhängig betrieben werden können. In Ausnahmefällen einsetzbare netzabhängige Geräte müssen für Messungen an geerdeten Objekten geeignet sein. Da überlagerte Wechselspannungen bei Potentialmessungen häufig vorhanden sind, sollte das verwendete Instrument eine möglichst hohe Wechselspannungsunterdrückung besitzen.

### 7.3.3 Bestimmung der Schutzstromdichte

Bei der Schutzstromdichte  $i$  handelt es sich um einen rein statistischen Wert, der sich in der Praxis nicht direkt messen lässt. Er ergibt sich aus dem benötigten Schutzstrom  $I$  und der geschützten Oberfläche  $A$ :

$$i = \frac{I}{A} \text{ [mA/m}^2\text{]} \qquad \text{Gl. 7.8)}$$

Genauere Angaben der Schutzstromdichte beziehen sich in der Regel auf ein bestimmtes Objekt bei bestimmten Potentialverhältnissen. Sie sind im strengen Sinne nicht übertragbar. Die Stromdichten für ein zu schützendes Objekt lassen sich im Voraus theoretisch nur sehr schwer bestimmen. Zur Abschätzung können deshalb nur Richtwerte und solche Faktoren aufgeführt werden, welche die Richtwerte beeinflussen (Strömung, Oberflächenzustand).

Umgebungsmedium	Stromdichte [mA/m <sup>2</sup> ]
Meerwasser, stark strömend (über 3 m/s)	150...200
Meerwasser, bewegt	100...150
Meerwasser, schwach bewegt	50...100
Meerwasser, ruhend	50
Süßwasser, stark strömend (über 3 m/s)	60...100
Süßwasser, bewegt	40... 60
Süßwasser, ruhend	35
Boden, belüftet, neutral	30... 35
Sandboden, wassergesättigt	10... 20
Boden, bindig, neutral	10... 20
Boden, anaerob, Bakterien	100...450
Boden, tiefe Schichten, sauerstoffarm, neutral	5... 15
Beton	3... 10

**Tabelle 7.3:** Richtwerte für Stromdichten

Um die Werte für die Stromdichten übersichtlich zu halten, ist es zweckmäßig, sie nur auf unbeschichtete, d. h. nicht beschichtete Oberflächen zu beziehen. Die Werte für die beschichteten Oberflächen ergeben sich dann aus der Fehlstellenrate in der Beschichtung.

Folgende Stromdichten (bezogen auf unbeschichtete Oberflächen) können als Richtwerte für die Berechnung von Schutzanlagen zugrunde gelegt werden:

- Die in Tabelle 7.3 genannten Werte gelten für Stahlflächen, die mit natürlichen Deckschichten aus Korrosionsprodukten bedeckt sind. Metallisch blanke Stahlflächen, wie sie z. B. durch mechanische Beanspruchungen gebildet werden, erfordern ein Mehrfaches der Stromdichten: 200...500 %.
- Ist mit einer ungleichmäßigen Stromverteilung z. B. an Spundwänden mit sehr tiefen Tälern oder bei geringem Abstand Anode/Kathode zu rechnen, muss die Stromdichte erhöht werden: 150...250 %.
- Bei sehr dicken Rostschichten oder wenn mit der Ausbildung fest haftender kathodischer Deckschichten gerechnet werden kann, erniedrigen sich die Stromdichten auf weniger als 50 %.
- In den oben genannten Fällen und wenn Zweifel bei der Abschätzung der erforderlichen Stromdichten bestehen, sollte bei unbeschichteten oder solchen Bauwerken, bei denen keine Veränderung in der Oberflächenbeschichtung zu erwarten ist, eine Schutzstrombestimmung erfolgen (Versuchseinspeisung).
- Die genannten Stromdichten gelten auch für den beschädigten Flächenanteil in beschichteten Oberflächen. Sie sind dazu auf die Fehlstellenrate umzurechnen.

- Die Fehlstellenraten in der Beschichtung müssen entsprechend den möglichen Einflüssen, die Fehlstellen erzeugen, zukunftsicher bezogen auf die Gesamtdauer der Schutzmaßnahme abgeschätzt werden. Die wesentlich günstigeren Fehlstellenraten im neuwertigen Zustand der Beschichtungen oder zu Beginn der Schutzmaßnahmen sind dabei außer Ansatz zu lassen. Das gilt auch für eine Versuchseinspeisung, die zukünftige Einflüsse nicht erfassen kann.
- Bei beschichteten Bauwerken werden die Gesamtflächen in Zonen aufgeteilt, für die je nach Beanspruchung die zu erwartenden Fehlstellenraten abgeschätzt werden müssen (s. Tabelle 7.4).

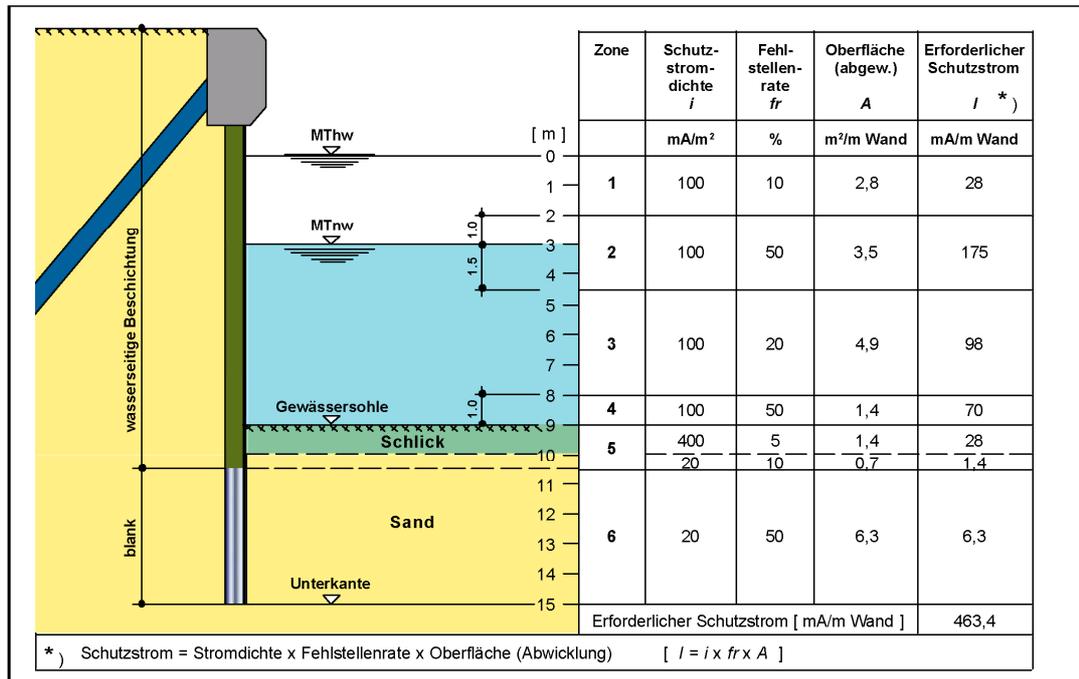
Hierbei können je nach Bauwerksform die folgenden Richtwerte angesetzt werden:

<p><b>Zone 1: (Wasserwechselzone)</b></p> <p>Bereich zwischen MThw und ca. 1 m über MTnw; Schäden durch mechanische Einflüsse, jedoch Reparatur der Beschichtung möglich. Fehlstellenrate 10 bis 30 %.</p>
<p><b>Zone 2: (Niedrigwasserzone)</b></p> <p>Bereich zwischen ca. 1 m über MTnw und ca. 1,5 m unter MTnw; Schäden durch mechanische Einflüsse; Reparatur der Beschichtung nicht möglich. Fehlstellenrate 30 bis 100 %.</p>
<p><b>Zone 3: (Unterwasserzone)</b></p> <p>Bereich zwischen ca. 1,5 m unter MTnw und ca. 1 m über Gewässersohle; geringe mechanische Einflüsse, Alterung der Beschichtung, Reparatur nicht möglich. Fehlstellenrate 20 bis 50 %.</p>
<p><b>Zone 4: (Gewässersohle)</b></p> <p>Anschließender Bereich bis zur Gewässersohle; mechanische Schäden durch Sandschliff oder Geschiebe (falls zutreffend, sonst gilt Zone 3); Fehlstellenrate 30 bis 100 %.</p>
<p><b>Zone 5: (Schlickzone)</b></p> <p>Bodenbereich bis Unterkante Beschichtung; keine Vergrößerung der Fehlstellen nach Fertigstellung des Bauwerks, geringe Alterung. Fehlstellenrate: Bindiger Boden 5 % Feinsand 5 % Sand 5...10 % Kies 10...15 % Maximum 20 %</p>
<p><b>Zone 6: (Bodenbereich)</b></p> <p>Bodenbereich zwischen Unterkante Beschichtung und Unterkante Bauwerk; hier kann die Schutzwirkung nach unten hin auslaufen, wenn neutrale Böden vorhanden sind und aus konstruktiven Gründen kein Korrosionsschutz benötigt wird. Stromdichte 5 %. In allen anderen Fällen: Stromdichte 100 %. In Ausnahmefällen, z. B. bei beschichteten Bauwerken mit geringer Bautiefe im Bodenbereich und relativ weitem Abstand Anode/Bauwerk, kann es zu Stromverlusten auf die in der Regel blanken Rückseiten kommen. In diesen Fällen sind die Rückseiten mit 20 bis 50 % der stromaufnehmenden Flächen anzusetzen.</p>

**Tabelle 7.4:** Zuordnung von Fehlstellen zu Wasser- und Bodenzonen



Aus den genannten Prozentsätzen und den zutreffenden Stromdichten aus Tabelle 7.3 lässt sich der Schutzstrombedarf in Ampere pro Meter Wandlänge oder Ampere pro Pfahl berechnen (Abb. 7.15).



**Abb. 7.15:** Beispiel für die Ermittlung des Schutzstrombedarfs

Dabei sind bei flachen Wänden (Kastenpfähle mit Zwischenbohlen), Rohrpfählen oder stark exponierten Flächen die höheren und bei Wänden mit tieferen Bohlentälern oder wenig exponierten Flächen die kleineren Prozentsätze zu berücksichtigen (Richtwerte für Schutzstromdichten siehe Tabelle 7.3):

Wand mit tieferen Tälern (Abwicklung einseitig pro m Wand: 1,4 m), Seewasser (bewegt), beschichtet bis 1,5 m unter Bodenlinie, 1 m Boden-reduzierend und bindig, weiter Sand.

Der so ermittelte Schutzstrombedarf pro m Wand dient nur als Bemessungsgrundlage für die Auslegung der Schutzstromgeräte und Anoden. Er entspricht dem zukünftig zu erwartenden Betriebsstrom. Der Strombedarf im Neuzustand der Anlage kann durchaus nur bei 1/10 des Bemessungsstroms liegen.

### 7.3.3.1 Einspeiseversuch

Der Schutzstrombedarf einer ebenen, räumlich abgegrenzten und unbeschichteten Stahlfläche lässt sich nach Erfahrungswerten abschätzen. An Bauwerken ist es jedoch genauer, wenn mit einer so genannten Versuchseinspeisung eine Schutzanlage, im günstigsten Falle ein Teilabschnitt der vorgeplanten realen Schutzanlage simuliert wird. Dabei werden provisorische, entsprechend leistungsfähige Anoden und ein mobiles Schutzstromgerät installiert. Bei der notwendigen Vorpolarisation mit hohen Stromdichten sind diese so zu begrenzen, dass vorhandene Beschichtungen nicht beschädigt werden, und die Wirkung der Stromeinspeisung je nach örtlichen Bedingungen über Stunden, Tage oder gar Wochen mit schreibenden Messgeräten zu überwachen.

Zwingend erforderlich können Versuchseinspeisungen an Bauwerken mit alter, d.h. in ihrer Wirksamkeit nicht mehr einschätzbarer, Beschichtung sein.

Ebenso an teilbeschichteten neuen Bauwerken, an nicht flächigen Bauwerken, bei erkannten Elementbildungen, bei Spundwänden mit tiefen Tälern, wenn der Abstand Anode/Kathode nur gering sein darf (Schiffe), und in ähnlichen Fällen, die Schwierigkeiten bei der Stromverteilung mit sich bringen.

Da die Versuchsanlage naturgemäß nur einen kleinen Teil eines größeren Bauwerks abdecken kann, sind die Stromverluste in die Randbereiche hinein bei der Auswertung zu berücksichtigen oder durch eine besondere Versuchsanordnung zu kompensieren. Auch mit dem Bauwerk in Verbindung stehende Stahlbetonobjekte können eine Versuchseinspeisung verfälschen.

Der Versuch soll an repräsentativer Stelle ausgeführt werden.

Bei einem nicht gleichförmigen Bauwerk ist u. U. an mehreren Stellen zu messen.

Die Versuchsanoden sind derartig anzubringen, dass sie einer künftigen Anodenanlage realitätsnah entsprechen. Insbesondere ist eine zu enge Anodenverteilung zu vermeiden. Der mit Versuchsanoden abgedeckte Bereich muss genügend groß sein, damit die Messergebnisse ohne Verfälschung durch die Randzonen ausgewertet werden können.

Vor der eigentlichen Schutzstrombestimmung ist genügend lange vorzupolarisieren. Über die Dauer entscheiden die erzielten Potentialwerte bzw. deren Abklingkurven, mit denen sich die Vorpolarisation beurteilen lässt.

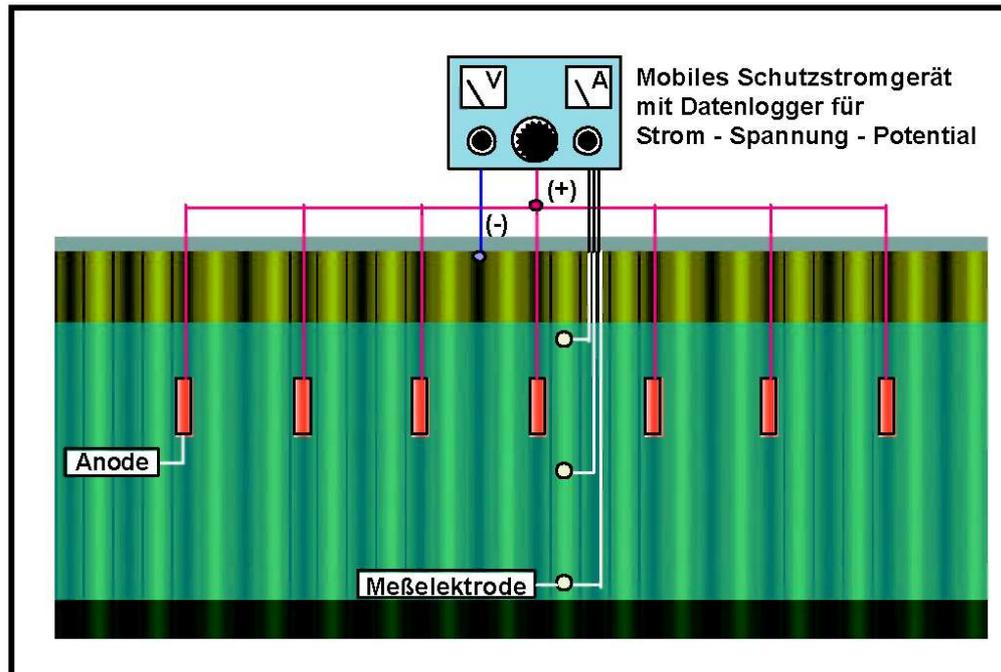
### **7.3.3.2 Durchführung eines Einspeiseversuchs mit Fremdstrom**

Nach der Vorpolarisation werden unterschiedlich hohe Versuchsströme mit Haltezeiten eingestellt und aus den jeweils erzielten Potentialen und den zuzuordnenden Oberflächen die spezifischen Stromdichten errechnet.

Stromdichten und Potentiale stehen über eine Exponentialfunktion miteinander in Zusammenhang. Durch Inter- oder Extrapolation lassen sich die Messergebnisse hinsichtlich der interessierenden Potential- oder Stromdichtebereiche auswerten.

Neben der Ermittlung der Stromdichten, die für sich allein wenig aussagen, sollte während des Versuchs die Stromverteilung bei gegebener, durchdachter Anodenanordnung untersucht werden. Gegebenenfalls ist die Anodenverteilung zu optimieren.

Versuchseinspeisungen sind dafür geeignet, zweifelhafte elektrische Durchverbindungen zwischen Spundbohlen, Leitern, Fendern, Bauwerksfugen usw. zu überprüfen (Abb. 7.16). Das Messverfahren ist im Abschn. 13.2 „Streustrombeeinflussungen“ beschrieben.



**Abb. 7.16:** Versuchsaufbau, Einspeiseversuch mit Fremdstrom

### 7.3.3.3 Versuchseinspeisung mit galvanischen Anoden

An größeren Bauwerken, die mit galvanischen Anoden geschützt werden sollen, wird ebenfalls empfohlen, eine Versuchseinspeisung durchzuführen. In diesem Falle ist es sogar zweckmäßig, dazu die Anodenart zu verwenden, die endgültig zum Einsatz kommen soll. Dabei lassen sich auch die Art der Anodenhalterung, der elektrische Anodenanschluss und Schutzmaßnahmen gegen mechanische Schäden an den Anoden in der Praxis testen. Eine Versuchseinspeisung mit galvanischen Anoden geht über eine Versuchseinspeisung im engeren Sinne hinaus und dient gleichzeitig als Versuchsbetrieb der geplanten Schutzanlage. Damit lassen sich alle Unsicherheiten, die mit der Planung galvanischer Schutzanlagen verbunden sind, im Praxisversuch erfassen und ausschalten.

Voraussetzung dafür ist, dass ein Vorentwurf in einer Durcharbeitung, die eine funktionierende Schutzanlage mit hoher Wahrscheinlichkeit erwarten lässt, vorliegt. Ein freies Experimentieren - wie bei einer Versuchseinspeisung mit Fremdstrom - ist hier nicht unbedingt möglich, weil die Montage der galvanischen Versuchsanoden relativ aufwendig und die Versuchszeiten, bis sich Ergebnisse einstellen, vergleichsweise lang sind.

Der Bauwerksbereich, in dem der Versuch stattfinden soll, muss repräsentativ für das Gesamtbauwerk sein hinsichtlich Bauwerksgeometrie, Schutzstrombedarf und mechanischer Beanspruchung der Anoden.

Der Versuchsbereich sollte mindestens die doppelte Breite der Wassertiefe bezogen auf MThw haben. Ein zu eng bemessener Versuchsbereich macht eine wirklichkeitstreuere Auswertung unmöglich. Empfohlen wird die vierfache Breite der Wassertiefe.

Um die Vorpolarisation zu beschleunigen, können - nur vorübergehend - Anoden mit höherer Treibspannung installiert oder Fremdstrom verwendet werden. Der Anteil an der Schutzstrombilanz ist bei der Versuchsauswertung zu berücksichtigen.

Der Aufbau der Polarisation sollte vorzugsweise mit schreibenden Messgeräten überwacht werden. Das gewährleistet, dass Einflüsse aus Jahreszeiten, kurz- oder langfristigen Änderungen der Wasserzusammensetzung, Tideinflüssen usw. auf die Potentiale erkannt und den Aufzeichnungen zeitlich zugeordnet werden können.

Nicht unbedingt notwendig, aber empfehlenswert ist es, einzelne der Versuchsanoden so anzubringen, dass ihre Stromabgabe registriert werden kann. Im Messkreis zwischen Anode und Schutzobjekt dürfen dabei nicht mehr als 2 bis 5 mV an Anoden-Treibspannung verloren gehen.

Je nach Zwischenergebnissen können zusätzlich benötigte oder überzählige Anoden hinzugefügt oder entfernt werden. Keinesfalls jedoch sollen unterschiedliche Anodenwerkstoffe miteinander kombiniert werden (Ausnahme Vorpolarisation).

Die Versuchsdauer sollte mindestens zwölf Monate (Jahreszyklus) betragen. Bei Zweifeln, ob während des Versuchs normale Verhältnisse angetroffen wurden (Wasserzusammensetzung, Temperaturen...), sollte der Versuch fortgeführt werden, bis die Übertragbarkeit auf einen jahrzehntelangen Betrieb der geplanten Schutzanlage gesichert erscheint.

Nach Versuchsabschluss werden die Anoden demontiert und die Stromabgabe anhand des Materialverbrauchs berechnet. Zusätzlich aufgewendeter Strom für die Vorpolarisation durch Zusatzanoden oder Fremdstrom ist dem so ermittelten Anodenverbrauch zuzuschlagen.

Bei der Versuchsauswertung sind Randeinflüsse durch die außerhalb des Versuchsbereichs liegenden Flächen zu berücksichtigen. Es empfiehlt sich, nur einen unbeeinflussten, mittleren Bereich auszuwerten, z. B. das mittlere Drittel. Daher ist von vornherein darauf zu achten, dass der Versuchsbereich eine dafür geeignete Symmetrie aufweist.

Die Versuchsergebnisse müssen mindestens eindeutige Schlüsse auf die Anodenverteilung, die Anodenformen und die Anodenlebensdauer der künftigen Anlage zulassen.

Bei genügend langer Versuchsdauer sind praktische Erfahrungen mit der Art der Anodenbefestigungen möglich. Es ist z. B. absehbar, ob zusätzliche Maßnahmen für den Schutz der Anodenkonstruktion gegen Eis- und Seegang oder anderweitige mechanische Beanspruchungen getroffen werden müssen.

#### **7.4 Widerstandmessung**

Zur Auslegung von kathodischen Korrosionsschutzanlagen und auch zur Überprüfung von einzelnen Teilen einer solchen Anlage werden Widerstandsmessungen durchgeführt. Dabei gilt das besondere Interesse zur Planung von kathodischen Korrosionsschutzanlagen der Messung der spezifischen Wasser- und Bodenwiderstände zur Auslegung der Anodenanlagen und der notwendigen Schutzstromgeräte.

#### 7.4.1 Messgeräte

Zur Widerstandsmessung werden ausschließlich Wechselstrommessgeräte verwendet, um die Ergebnisse nicht durch Polarisierungseffekte zu verfälschen.

Dabei werden meist handelsübliche Erdungsmessgeräte mit vier Anschlussklemmen benutzt. In Sonderfällen, z.B. bei Messungen der spezifischen Bodenwiderstände in großer Tiefe, auch so genannte Tiefenmessgeräte, die mit höheren Spannungen und empfindlicheren Messeingängen auch für diese Anwendung geeignet sind.

Das Prinzip der Messgeräte besteht darin, dass an zwei Klemmen ein Mess-Wechselstrom abgegeben wird und über eine Widerstandskompensationsbrücke der Widerstand an den beiden Eingangsklemmen bestimmt wird.

#### 7.4.2 Direkte spezifische Widerstandsmessung (Soilbox)

Bei der Bestimmung des spezifischen Wasserwiderstands in  $\Omega \cdot \text{cm}$  wird im Allgemeinen eine „Soilbox“ zusammen mit einer Wechselstrom-Widerstandsmessbrücke verwendet (s. Abb. 7.17). Dabei kann genau genommen nur der effektive Wasserwiderstand bei Messtemperatur und nicht der spezifische Widerstand erfasst werden, weshalb immer gleichzeitig die Probentemperatur gemessen und der Widerstand entsprechend korrigiert werden muss, wenn Messwerte miteinander zu vergleichen sind.

Dabei wird eine Messzelle mit einer seitlichen Querschnittsfläche  $S$  und einer Länge  $l$  genommen und der spezifische Widerstand ( $\rho$ ) nach folgender Formel ermittelt:

$$\rho = \frac{R \cdot S}{L} = \frac{U \cdot S}{I \cdot L} \quad [\Omega \text{ cm}] \quad \text{Gl. 7.9)}$$

$\rho$  = spezifischer Widerstand [ $\Omega \text{ cm}$ ]

$R$  = gemessener Widerstand [ $\Omega$ ]

$S$  = Querschnittsfläche der Messzelle [ $\text{cm}^2$ ]

$L$  = Länge der Messzelle [ $\text{cm}$ ]

$U$  = Spannung an den Querschnittsflächen [ $\text{V}$ ]

$I$  = Messstrom zwischen den Querschnittsflächen [ $\text{A}$ ]

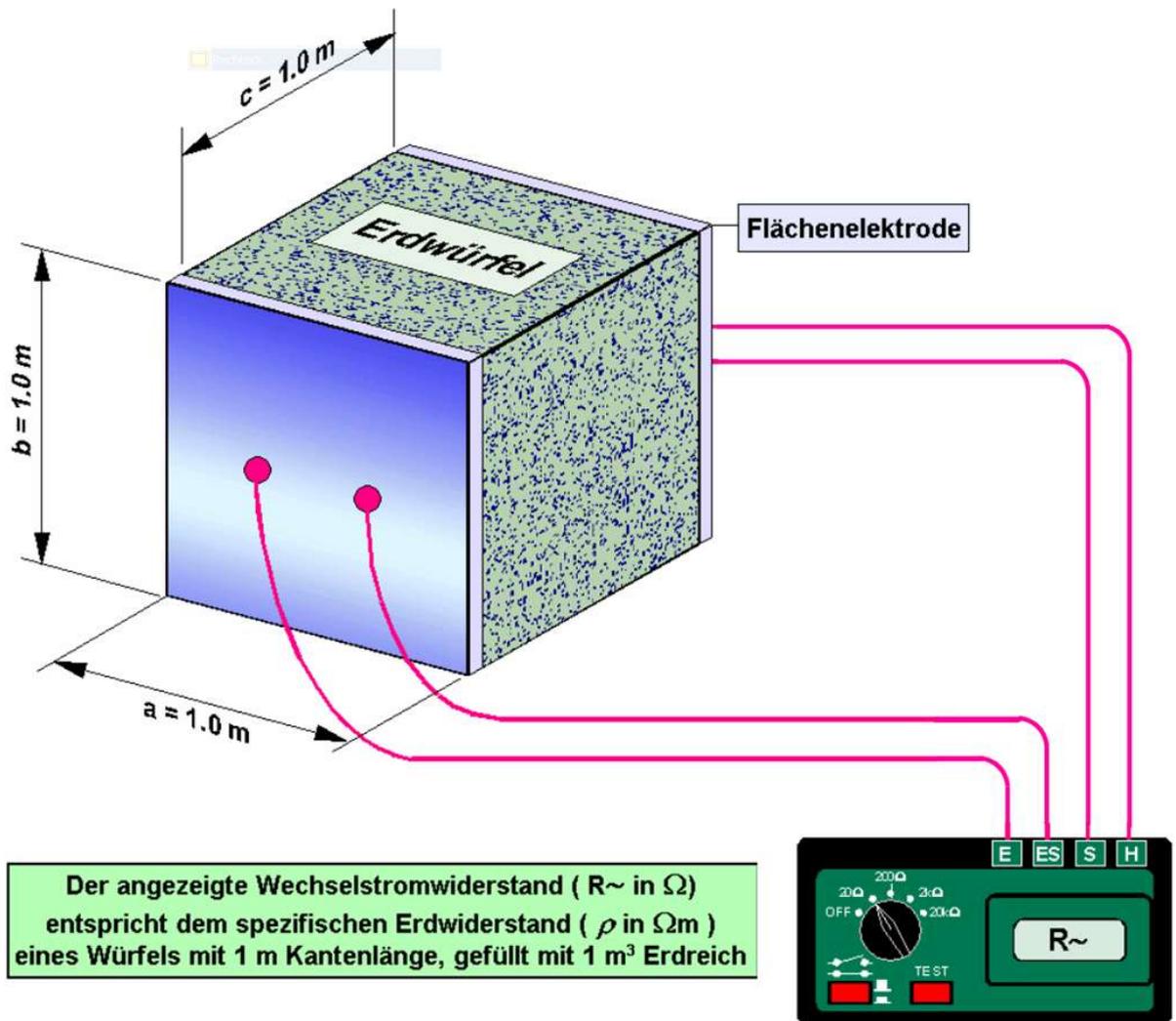


Abb. 7.17: Widerstandsmessbrücke

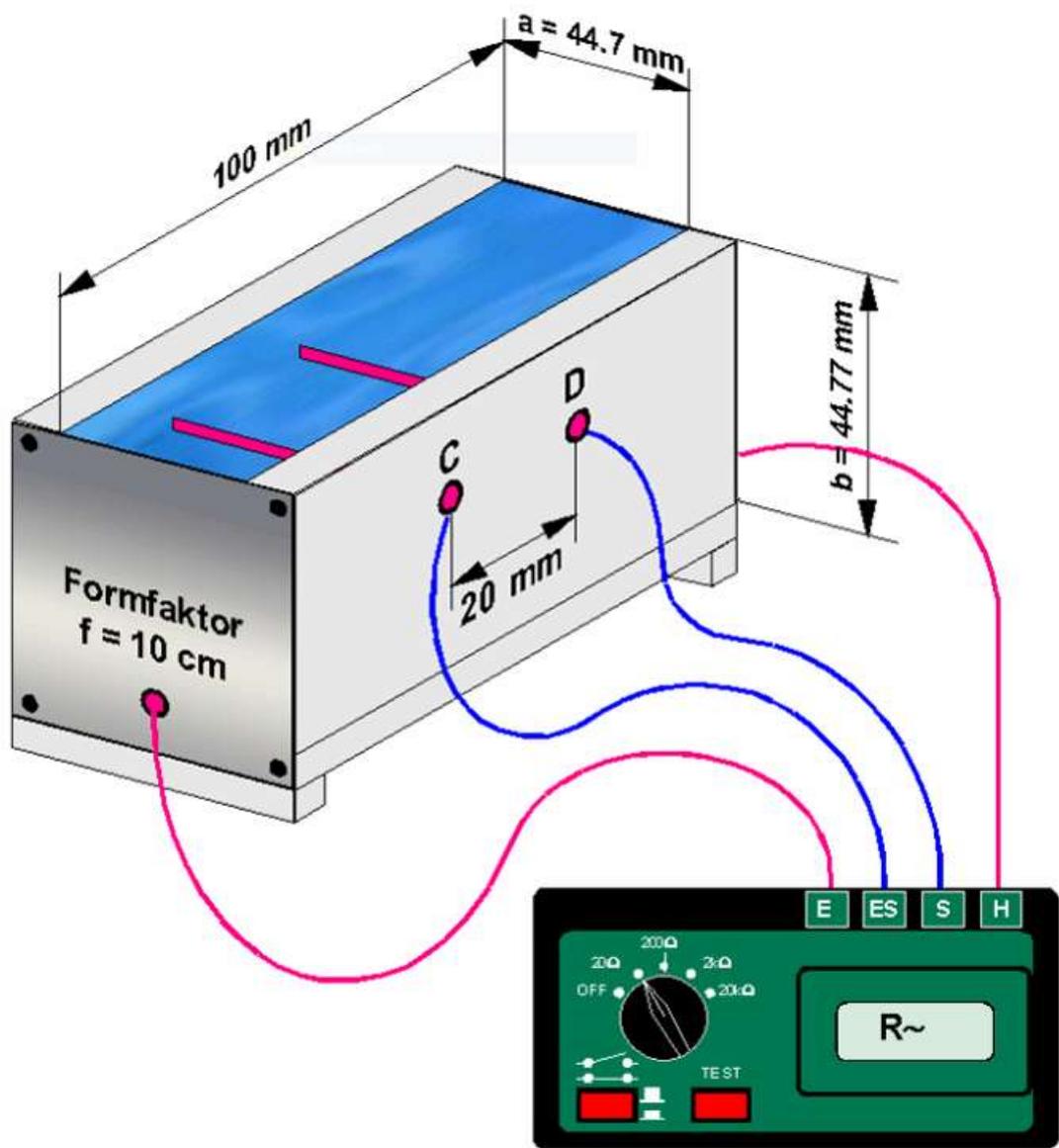
Für die Eliminierung des Übergangswiderstandes an den Seitenflächen nimmt man das Vier-Elektroden-Verfahren entsprechend Abb. 7.18

Die Umrechnung von spezifischem Widerstand  $\rho$  in spezifische Leitfähigkeit  $\chi$  erfolgt nach der Formel:

$$\chi = \frac{1}{\rho} \cdot 10^6 \text{ } [\mu\text{S/cm}] \quad \text{Gl. 7.10)}$$

$\chi$  = Spezifischer Leitwert [ $\mu\text{S/cm}$ ]

$\rho$  = spezifischer Widerstand [ $\Omega\text{ cm}$ ]



**Abb. 7.18:** Vier-Elektroden-Verfahren

### 7.4.3 Indirekte spezifische Widerstandsmessung (Schlumberger-Wenner-Verfahren)

Bei dem Schlumberger-Wenner-Verfahren handelt es sich um eine indirekte Bestimmung des spezifischen Widerstandes (s. Abb. 7.19).

Für die Messung an der Erdoberfläche werden auf einer Geraden vier Erdspieße als Elektroden gesetzt. Die beiden äußeren Elektroden werden mit den Stromausgängen eines Erdungsmessgerätes verbunden und die inneren beiden Elektroden mit den Eingangsklemmen des Erdungsmessgerätes.

Dabei ergibt sich durch den eingepprägten Strom ein halbraumförmiges elektrisches Feld, das dem eines Dipols entspricht. Im mittleren Bereich ergibt sich eine relativ homogene Feldverteilung und die Potentialdifferenz zwischen diesen beiden Elektroden wird als Maß für den spezifischen Bodenwiderstand genommen.

Es ergibt sich damit aus der Messung folgender spezifischer Widerstand:

$$\rho = 2\pi \cdot A \cdot \frac{U}{I} \text{ [}\Omega \text{ m]} \text{ (Wenner-Methode, wenn } A = B) \quad \text{Gl. 7.11)}$$

$$\rho = \pi \cdot A \cdot \frac{U}{I} \left( \frac{B}{A} + \frac{B^2}{A^2} \right) \text{ [}\Omega \text{ m]} \text{ (Schlumberger-Methode, wenn } A > B) \quad \text{Gl. 7.12)}$$

$$t = \frac{A + 2B}{2} \text{ [m] Messtiefe} \quad \text{Gl. 7.13)}$$

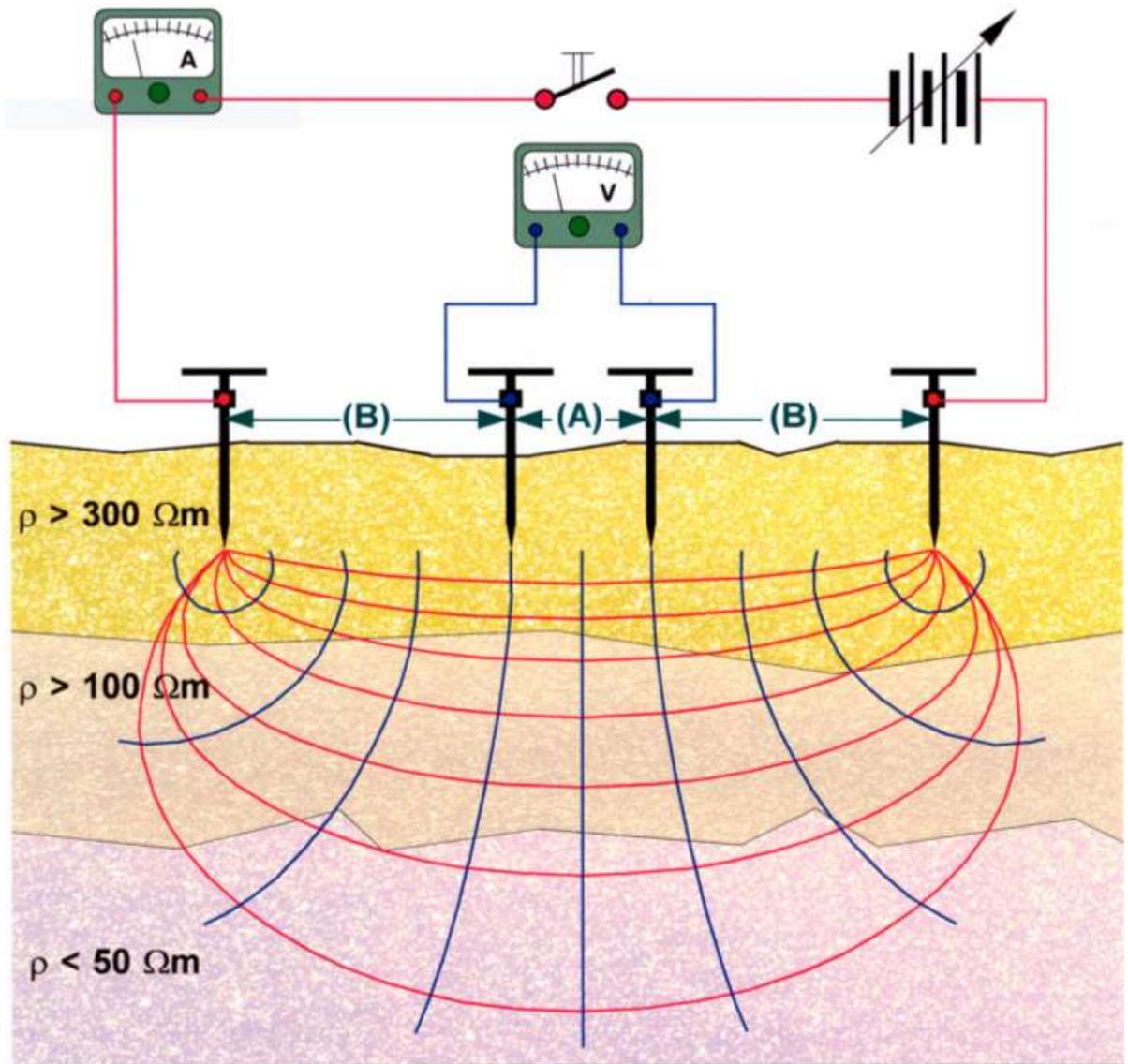
$\rho$  = spezifischer Widerstand [ $\Omega$  m]

A = Abstand zwischen inneren Elektroden [m]

B = Abstand zwischen innerer und äußerer Elektrode [m]

U = Gemessene Spannung zwischen inneren Elektroden [V]

I = Messstrom zwischen äußeren Elektroden [A]



**Abb. 7.19:** Bestimmung des spezifischen Widerstands

#### 7.4.4 Leitfähigkeitsmessung des Wassers

Aus der Leitfähigkeit ergeben sich wichtige Folgerungen für die Planung von Korrosionsschutzanlagen wie Aufwand für die Anodenanlage und die zu erwartende Stromverteilung. Vom Salzgehalt des Wassers hängt seine spezifische Leitfähigkeit (gemessen als  $\chi$  bei 20 °C in  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) bzw. sein spezifischer Widerstand (gemessen als  $\rho$  in  $\Omega \cdot \text{cm}$  oder  $\Omega \cdot \text{m}$ ) bei 20 °C ab.

Lokalität	Leitfähigkeit
Geeste oberhalb Tidesperrwerk Bremerhaven	400 $\mu\text{S}/\text{cm}$
Geeste unterhalb Tidesperrwerk Bremerhaven*)	400 bis 14.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$
Elbe bei Hamburg-Altona	1.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$
Weser bei Bremerhaven*)	4.000 bis 30.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$
Seewasser bei Helgoland	37.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$
Küstenwasser bei Cuxhaven*)	9.000 bis 33.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$

\*) : Je nach Tidephase

**Tabelle 7.5:** Beispiele spezifischer Widerstände (Mittelwerte)

Exakter ist die Messung der spezifischen Leitfähigkeit mit speziellen Messgeräten, welche die Probetemperatur erfassen und automatisch auf die spezifische Leitfähigkeit bei normierter Bezugstemperatur (meist 20 °C) kompensieren.

Die Umrechnung von spezifischer Leitfähigkeit in spezifischen Widerstand erfolgt nach der Formel:

$$\rho = \frac{1}{\chi \cdot 10^6} [\Omega \cdot \text{cm}] \quad \text{Gl. 7.14)}$$

$\chi$  = Spezifischer Leitwert [ $\mu\text{S}/\text{cm}$ ]

$\rho$  = spezifischer Widerstand [ $\Omega \cdot \text{cm}$ ]

Es ist zu prüfen, ob das Wasser Leitfähigkeitsunterschiede abhängig von der Wassertiefe zeigt. Gegebenenfalls sind Proben in der voraussichtlichen Höhenlage der künftigen Anoden zu entnehmen.

Leitfähigkeits- bzw. Widerstandsmessreihen sind immer zusammen mit den zugehörigen Temperaturmessreihen aufzustellen, da bei der Berechnung der Anodenanlage beide zusammen ausgewertet werden.

Zur Langzeitbeobachtung eignen sich Geräte mit digitaler oder schreibender Messwertregistrierung. Dabei ist jedoch zu beachten, dass es schwierig sein kann, die Kalibrierung der Messgeber über längere Zeit konstant zu halten.

#### 7.4.5 Übergangswiderstandsmessung

Die Übergangswiderstandsmessung von z.B. nicht geschützten Objekten zu geschützten Objekten erfolgt nach der Zwei-Punkt-Methode (s. Abb. 7.20). Dabei werden die beiden Erderanschlüsse an dem ersten Objekt angeschlossen und der Sonden- und der Hilfserderanschluss an dem zweiten Objekt angeschlossen und der entsprechende Widerstand abgelesen.

#### 7.4.6 Ausbreitungswiderstandsmessung

Ausbreitungswiderstände von z.B. Anoden erfolgen nach der Drei-Elektroden-Methode (s. Abb. 7.21). Dabei wird der Messstrom über die zu messende Anode (Erder) und Hilfserder eingespeist und die Spannung zwischen Anode (Erder) und Sonde gemessen. Dabei soll der Hilfserder mindestens 40m (oder 4mal die Ausdehnung der Anode (Erder-)) und die Sonde mindestens 20m (oder 2mal die Ausdehnung der Anode (Erder-)) von der zu messenden Anode (Erder) entfernt sein.

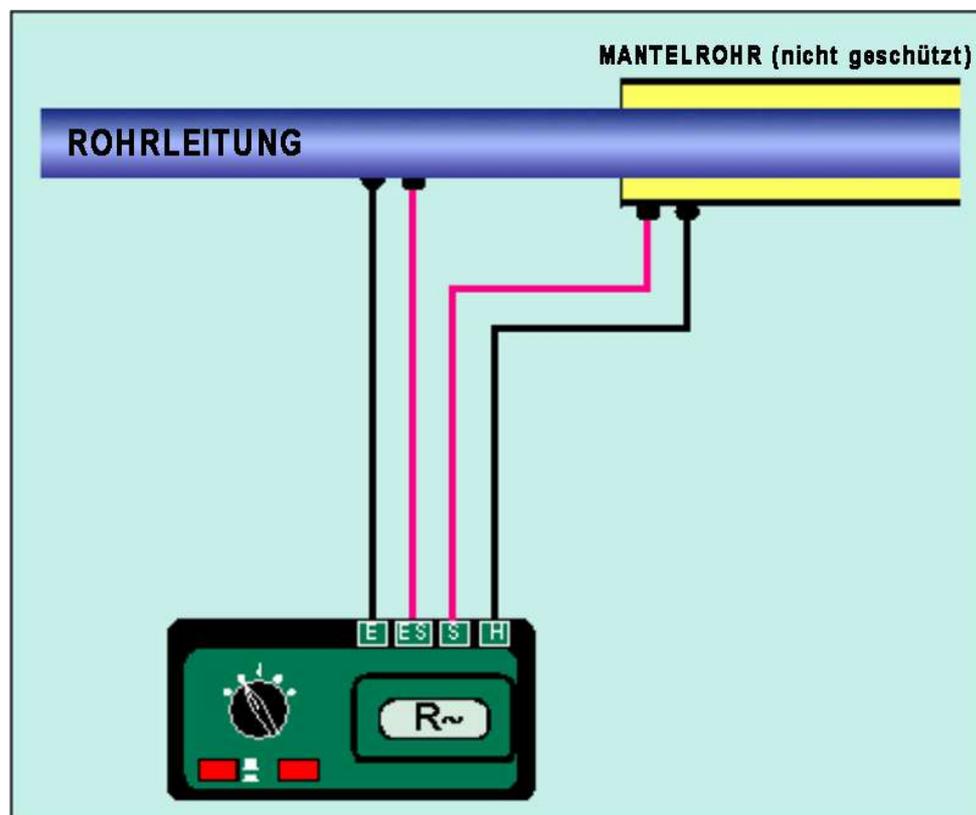


Abb. 7.20: Zwei-Punkt-Methode

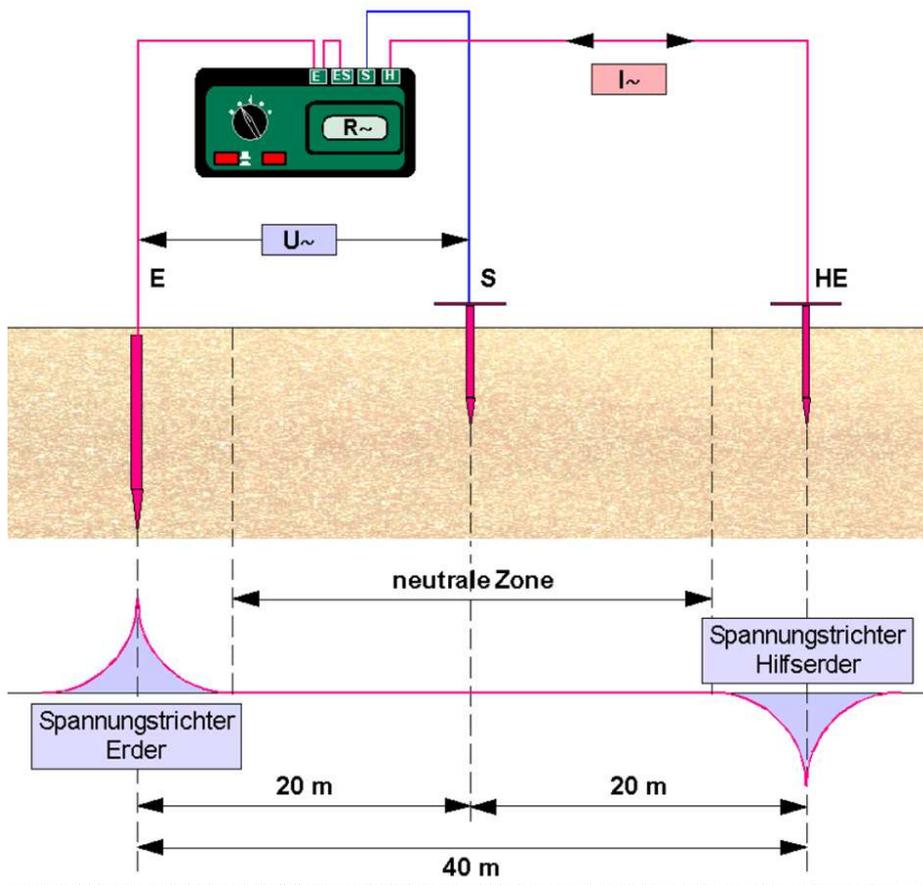


Abb. 7.21: Drei-Elektroden-Methode

## **8. Voruntersuchungen bzw. Vorausmessungen**

Für die Konstruktion und Bemessung einer Kathodenschutzanlage sind Voruntersuchungen und Vorausmessungen erforderlich. Diese sind bereits in der Planungsphase bzw. bei der Errichtung eines Bauwerks durchzuführen (auch sinnvoll bei einem nachträglichen Einbau einer Schutzanlage).

### **8.1 Allgemeines**

Im Vorfeld der Bauausführung sind zunächst umfangreiche Erhebungen zu dem geplanten Schutzobjekt bzw. bei bestehenden Objekten zusätzlich zu dem aktuellen Zustand erforderlich.

Nachfolgende Unterlagen und Daten sind für die Erhebung wichtig:

- Anlagenpläne allgemein
- Vorschriften und Empfehlungen
- Vorplanungen für kathodische Schutzanlagen mit Schutzobjekten, Schutzstromgeräten, Messeinrichtungen, Niederspannungsanschluss, Kabelverlegung
- Art der Konstruktion wie z. B. Spundwände, Schleusentore, Wehre, Hebewerkströge, Kanalbrücken, Pumpen und Turbinen.

Konstruktionsentwürfe sollten rechtzeitig die Erfordernisse für eine Installierung des kathodischen Schutzes berücksichtigen (Tabelle 8.1).

Bei Einsatz von nicht untereinander isolierten Mischkonstruktionen besonders in aggressiven Wässern kommt es auf Grund des unterschiedlichen Potentials zu Kontaktkorrosion sowie an den Fehlstellen der passiven Beschichtung zu intensiven Materialabtrag im anodischen Bereich.

Einflüsse	Vorgehensweise – Festlegungen
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bestimmung des Schutzzumfangs</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Festlegung der Größe der zu schützenden Bauteilflächen,</li> <li>- Flächenanteil unbeschichtet,</li> <li>- Rostgrad des unbeschichteten Flächenanteils nach DIN EN ISO 8501 [1] bzw. [2]</li> <li>- Flächenanteil, beschichtet</li> <li>- Rostgrad des beschichteten Flächenanteils (Ri 1 - Ri 5) nach DIN EN ISO 4628-3 [2]</li> <li>- Chromnickel-Stahlfläche, unbeschichtet</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Standorteinflüsse</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- wie Schiffsverkehr, passierend, ruhend, Verkehrsdichte</li> <li>- Umschlagart und –frequenz</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mechanische Einflüsse</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Schiffsberührung</li> <li>- Sandschliff</li> <li>- Eisgang</li> <li>- Treibgut</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Physikalische Einflüsse</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Strömung</li> <li>- Turbulenzen</li> <li>- Wellenschlag</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fremdoobjekte im Nahbereich wie</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Stahl (Leitwerke)</li> <li>- Stahlbeton</li> <li>- Rohrleitungen</li> <li>- Kabel</li> <li>- Erdungsanlagen</li> </ul>

**Tabelle 8.1:** Zustandsaufnahme am zu schützenden Objekt

Zu Anlagen und Bauwerksteilen mit niederohmigem Ausbreitungswiderstand dürfen keine metallischen Kontakte vorhanden sein, andernfalls können schädliche Beeinflussungen auftreten.

#### Streustromeinflüsse

Berücksichtigung des möglichen Auftretens von unkontrollierten Strömen aus benachbarten Gleichstromanlagen (externe Streuströme) und Strömen in oder aus einem kathodischen Schutzsystem, die nicht bewusst einbezogene Bauwerksteile oder Anlieger beeinflussen (interne Streuströme). Das Schutzobjekt muss eine durchgehende metallische Leitfähigkeit haben, um die Gefahr von internen Streuströmen zu vermeiden, siehe Kapitel 13.

#### Korrosive Einflüsse

Bei bestehenden Bauwerken kann die Korrosionsbelastung am besten durch Messung der Korrosionsabträge an den Bauteilen selbst ermittelt werden, siehe Abschnitt 8.2.3.

Bei geplanten Bauwerken sind geeignete Untersuchungen der Korrosionsmedien notwendig, um die zu erwartende Korrosionsintensität abschätzen zu können, siehe Abschnitt 8.2.1.

Hilfreich ist es, Erfahrungen der Korrosionsbelastung oder sogar von aufgetretenen Korrosionsschäden an Nachbarbauwerken oder auch ähnlichen Bauwerken heranzuziehen.

Zusätzlich sollten zukünftig wirksame Einflüsse berücksichtigt werden, welche die bestehenden Korrosionsbedingungen verändern können.

Besteht der Möglichkeit, dass an dem geplanten Bauwerk extreme Korrosion im Niedrigwasserbereich auftritt, kann eine entsprechende Risikountersuchung größeren Aufschluss geben, siehe Abschnitt 8.2.2.

#### Potentialmessungen

Aus den an einem Bauwerk messbaren freien Korrosionspotentialen kann auf die Intensität und örtliche Verteilung der Korrosion geschlossen werden, siehe Abschnitt 8.3.

#### Untersuchung des Schutzstrombedarfs

Genauer als eine Abschätzung des Schutzstrombedarfs nach Erfahrungswerten sind Versuchseinspeisungen, siehe Abschnitt 8.4.

## **8.2 Untersuchung der Korrosionsbelastung**

### **8.2.1 Allgemeine Einflüsse aus dem Wasser**

In natürlichen Wässern sind Salze, vorwiegend Chloride aber auch Sulfate und Bikarbonate gelöst. Weitere Anionen spielen im Allgemeinen nur eine untergeordnete Rolle. An Kationen herrschen Natrium, Kalium, Kalzium und Magnesium vor. Der Salzgehalt von natürlichen Wässern kann zwischen der Nachweisgrenze bei Quellwässern aus kristallinen Gesteinen und ca. 3,5 M.-% im Meerwasser variieren. In besonderen Fällen treten noch höhere Werte auf.

Besonders zu beachten sind durch Einleitungen verunreinigte Wässer und z. B. Wässer aus der Tiefe (Mineralquellen oder Bergbau). In diesen Fällen können zusätzliche Anionen und Kationen vorhanden sein oder ungewöhnlich hohe Konzentrationen der eingangs genannten.

Vom Salzgehalt des Wasser hängt seine spezifische Leitfähigkeit (gemessen bei 20 °C in (S/cm) bzw. sein spezifischer Widerstand (gemessen in Ohm • cm oder Ohm • m) ab (s. Tabelle 7.5 in Abschnitt 7.4.4).

Aus der Leitfähigkeit ergeben sich wichtige Folgerungen für die Planung von Korrosionsschutzanlagen wie Aufwand für die Anodenanlage und die zu erwartende Stromverteilung. Die Leitfähigkeit ist abhängig von der Temperatur und wird deshalb als "spezifische Leitfähigkeit" bei Bezugstemperatur (meistens 20 °C) gemessen. Ihr Temperaturkoeffizient liegt bei natürlichen Wässern zwischen 2,0 und 2,5 % / °C. Der formelmäßige Zusammenhang lautet:

$$x_t = x_{20} [1 + \alpha (t - 20)] \quad \text{Gl. 8.1)}$$

$x_t$  = Leitfähigkeit bei beliebigem Temperaturwert  $t$

$x_{20}$  = Spezifische Leitfähigkeit bei  $t = 20^\circ\text{C}$

$\alpha$  = Temperaturkoeffizient ca. 2,0 bis 2,5 % / $^\circ\text{C}$

Damit halbiert ein Wasser bei Abkühlung von  $20^\circ\text{C}$  im Sommer auf  $0^\circ\text{C}$  im Winter seine Leitfähigkeit nahezu. Das hat wesentliche Auswirkungen auf die Stromabgabe von Schutzanlagen und auf die Verteilung des Schutzstroms (zur Durchführung von Leitfähigkeitsmessungen siehe Abschnitt 7.4).

Die Korrosionsgeschwindigkeit ist abhängig vom Sauerstoffgehalt des Elektrolyten. Er fällt mit steigender Temperatur von 14,6 mg/l bei  $0^\circ\text{C}$  auf 9,2 mg/l bei  $20^\circ\text{C}$  bei gesättigtem Süßwasser. Trotzdem nimmt die Korrosion mit steigender Temperatur nicht ab, da die Diffusions- und Reaktionsgeschwindigkeit des Sauerstoffs ansteigt, was das Weniger an Sauerstoff überkompensiert.

In diesem Zusammenhang muss beachtet werden, dass auch bei geringem Sauerstoffgehalt die Korrosionsgeschwindigkeit kaum beeinflusst wird. Erst wenn er sich Werten unter 2 mg/l nähert, kann mit bedeutsamer Verringerung der Korrosionsgeschwindigkeit gerechnet werden.

Wichtiger als der Gehalt an Sauerstoff ist dessen Diffusion aus dem Elektrolyten an den Stahl, wobei Strömungsgeschwindigkeiten, Turbulenzen und Durchlässigkeit von Böden, und bei bestehenden Bauwerken auch Bewuchs, Deckschichten aus Korrosionsprodukten oder Beschichtungsreste von Bedeutung sind.

Die Wirksamkeit des kathodischen Schutzes und die Funktion von Schutzanlagen wird von Kalzium-, Magnesium- und Phosphat-Ionen beeinflusst. Ohne die beiden erstgenannten Ionen ist ein effektiver kathodischer Schutz kaum realisierbar, da sich keine kathodischen Deckschichten bilden. Das wäre z. B. der Fall in einem Flusswasser mit sehr geringer Wasserhärte aber mit deutlichen Gehalten an Kohlensäure und Sauerstoff bzw. in einem Moorwasser. Normale Fluss- und Grundwässer enthalten jedoch ausreichende Mengen der benötigten Kationen.

In verunreinigten Wässern können Phosphat-Ionen aus kommunalen Abwässern vorhanden sein. Diese bilden ab kritischen Gehalten dichte Deckschichten auf Zink- und Aluminiumanoden, welche die Stromabgabe ganz oder teilweise verhindern. Von welcher Konzentration an Phosphate stören, hängt von der Anwesenheit und Menge anderer Anionen, wie z. B. Chloriden, Sulfaten und Nitraten, und der spezifischen Stromdichte, das heißt der Belastung der Anoden ab. Hohe Chloridgehalte wie im Meerwasser machen den Einsatz der genannten Opferanoden meistens unbedenklich, in Brackwässern ist aber schon Vorsicht geboten (Tabelle 8.2).

<b>Unbekannte Wässer</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Wassertemperatur (am Probeort messen)</li> <li>- Sauerstoff (am Probeort messen)</li> <li>- Sulfate</li> <li>- Phosphate</li> <li>- Magnesium</li> <li>- Sulfide bzw. H<sub>2</sub>S in Gewässersohle</li> <li>- Carbonate</li> <li>- Bicarbonate</li> <li>-</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- pH-Wert</li> <li>- spezifische Leitfähigkeit (bezogen auf 20 °C)</li> <li>- Chloride</li> <li>- Kalzium</li> <li>- Nitrate</li> <li>- Nitrit</li> <li>- Ammonium</li> </ul>
<b>Industriell verunreinigte Wässer</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>- alle Halogenide</li> <li>- Mangan</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Organische Stoffe</li> </ul>

**Tabelle 8.2:** Untersuchungsparameter für Wässer

Ferner ist zu entscheiden, ob mehrere Wasserproben aus unterschiedlicher Tiefe, bei unterschiedlichen Wasserständen und Wasserführungen für eine sinnvolle Beurteilung erforderlich sind.

### 8.2.2 Besondere Verhältnisse in Flussmündungen (Aestuarien)

Die Leitfähigkeit in Bereichen von Aestuarien kann durch die Überlagerung von See- und Flusswasser sehr stark schwanken (Beispiel: "Weser bei Bremerhaven"; s. oben). Bei der Untersuchung der Wasserverhältnisse sind daher verschiedene Einflüsse zu beachten:

- Für den Betrieb einer Schutzanlage sind die mittleren Wasserverhältnisse, die sich aus dem Tidenverlauf und den jahreszeitlich bedingten Schwankungen (Temperaturen, Windrichtung, Wasserführung) ergeben, entscheidend - nicht die Extremwerte.
- Die Länge und jahreszeitliche Verteilung der Perioden mit Minimalleitfähigkeit muss bekannt sein. Obwohl technisch möglich, kann es unwirtschaftlich werden, eine Fremdstrom Anodenanlage so auszulegen, dass auch bei Minimalleitfähigkeiten immer genügend Strom abgegeben wird. Zwischen Ausfallzeiten und Größe der Anodenanlage ist ein Kompromiss zu suchen. Anlagen mit galvanischen Anoden können periodisch unwirksam werden, was bei der Planung zu berücksichtigen ist.
- Einerseits sind Messungen vor Ort der geplanten Schutzanlage über einen kompletten Jahreszyklus ideal. Andererseits ist es aber auch ersatzweise möglich, vorhandene Messreihen (Umweltschutz, Planfeststellungsverfahren, wissenschaftliche Arbeiten) mit zu gezielten Zeiten angesetzten Einzelmessungen zu verarbeiten, um zu einer aussagefähigen Kurve zu gelangen, die mindestens über ein Jahr die Leitfähigkeit als Spannweitendiagramm bei Hoch- und Niedrigwasser angibt. Derartige Kurven lassen sich auch aus vorhandenen Messreihen über Salzgehalt und Temperatur errechnen.

- Bei Schutzanlagen für beschichtete Bauwerke bzw. Stahlbauteile spielen diese Punkte eine mehr untergeordnete Rolle, da wegen des geringen spezifischen Schutzstrombedarfs eine Anpassung an Minimalleitfähigkeiten praktisch immer möglich ist, für unbeschichtete oder ältere beschichtete Bauwerke sind sie aber entscheidend für die Wirksamkeit. Besonders bei korrosionsgeschädigten Bauwerken, bei denen sich Ausfallzeiten durch zeitweilig zu geringe Leitfähigkeit zu nicht tolerierbarer Restkorrosion addieren können, sollten Planungen nur nach sorgfältigen Vorstudien begonnen werden.
- Wenn derartige Voruntersuchungen nicht möglich sind, sind anhand von Stichproben Durchschnitte, Minima und Maxima der Leitfähigkeit abzuschätzen. In einem solchen Falle sollte aber eine Schutzanlage nicht in einem Zuge fertig geplant und gebaut, sondern erst ein Teil (einzelner Schutzbereich o. ä.) als Versuchsstrecke erstellt und über mindestens einen Jahreszyklus mit Messwertregistrierung betrieben werden.

### **8.2.3 Gefährdungspotential für Niedrigwasserkorrosion**

Bei Stahlspundwänden im Meerwasser kann es im Bereich unterhalb des Niedrigwassers zu besonders hoher örtlicher Korrosion kommen. Hierbei scheint es sich um Makroelementbildung mit zusätzlichen mikrobiologisch induzierten Korrosionsvorgängen (MIC) zu handeln, die durch höhere Konzentrationen an verwertbaren organischen Wasserinhaltsstoffen beschleunigt werden.

Mikrobiologische Untersuchungen zeigten, dass anaerobe sulfatreduzierende Bakterien (SRB) in Synergie mit aeroben schwefeloxidierenden Bakterien den Korrosionsprozess auch bei niedrigen Schwefelkonzentrationen auf Dauer aufrechterhalten können [3].

Zur Beurteilung, ob ein bestehendes Bauwerk von extremer Niedrigwasserkorrosion betroffen ist, wurden umfangreiche Untersuchungen an 22 Spundwandbauwerken selbst, dem umgebenden Meerwasser sowie an den Korrosionsprodukten durchgeführt mit dem Ziel, ein Risikovorhersagemodell zu entwickeln.

Die statistische Auswertung mit Hilfe des sogenannte „t-tests“ ergab nach [4], dass das Risiko des Auftretens extremer Niedrigwasserkorrosion höher ist bei

- geringer Tide
- starkem Algenbefall
- kleinen pH-Werten unter der Rostschicht
- hohen Zellzahlen an sulfatoxidierenden Bakterien in der Rostschicht
- höheren Gehalten an organischem Kohlenstoff, Wasserstoff und Stickstoff in der Rostschicht
- hohem FeS-Gehalt in der Rostschicht
- hohem organischen Kohlenstoffgehalt im Seewasser

Zur Anwendung des Risikovorhersagemodells siehe [4].

## **8.2.4 Messung von Korrosionsabträgen**

### **8.2.4.1 Allgemeines**

Während die Untersuchung der allgemeinen Korrosionseinflüsse mehr theoretischer Art ist, besteht mit der Messung der Stahlwanddicken an der Spundwand selbst die Möglichkeit, die tatsächliche Korrosionsintensität zu bestimmen.

Wanddickenmessungen sollten dann durchgeführt werden, wenn beim Neubau im Küstenbereich auf Korrosionsschutz verzichtet worden ist bzw. um die Wirksamkeit eines bestehenden KKS-Systems zu überprüfen.

In beiden Fällen sollte direkt beim Einbau der Spundwand eine so genannte Nullmessung erfolgen. Durch Differenz dieser Ausgangswanddicken mit den Ergebnissen späterer Restwanddickenmessungen kann der reale Korrosionsabtrag ermittelt werden.

Bei schon langjährig bestehenden Stahlwasser-Bauwerken ohne Nullmessung muss als Ausgangswanddicke die Nennwanddicke herangezogen werden, wobei die Möglichkeit einer Walztoleranz einen Unsicherheitsfaktor darstellt und es so lediglich zu einer Abschätzung des Korrosionsabtrages kommen kann. Mit der Standzeitdauer, wird dieser Fehlereinfluss allerdings geringer.

Die in der Praxis heute angewandten Verfahren der Wanddickenmessungen sind

- mechanische Abtastung und
- Ultraschallmessung.

### **8.2.4.2 Mechanische Abtastung**

Mechanische Messgeräte wie die verschiedensten Messschrauben erfordern bei der Anwendungen eine beidseitig vorbereitete Oberfläche der Messstelle.

Dadurch und auch durch die Bügellänge bedingt, ist der Gebrauch auf Kanten- oder Randbereiche beschränkt. Die theoretische Messgenauigkeit liegt bei  $\pm 0,1$  mm. Die praktische Genauigkeit ist von Faktoren abhängig wie Bedienungssorgfalt oder Wahl eines geeigneten Messgerätes, das die Rauigkeit der korrodierten Oberfläche berücksichtigt. Dieses Verfahren ist in der Vergangenheit häufig an Probestücken, die aus den zu untersuchenden Stahlprofilen herausgebrannt wurden, angewendet worden.

Nachteilig wirkt sich aus, dass ohne Gegenmaßnahmen wie Aufschweißen einer Ersatzplatte das Tragwerk geschwächt wird oder bei Spundwandbauwerken die Hinterfüllung auslaufen kann. Das Ausbohren von Kernbohrungen (mit anschließendem Verschweißen der Bohrung) ist eine weitere Möglichkeit, Aussagen auf die verbliebene Wanddicke zu erhalten, allerdings nur punktuell.

### 8.2.4.3 Ultraschallmessungen

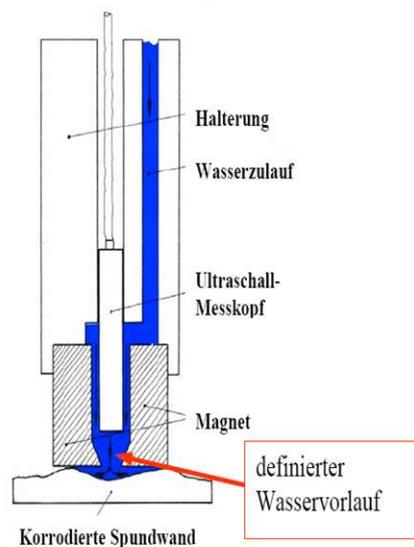
Für Bauwerksüberprüfungen hat sich heute das Messen mit dem Ultraschallverfahren durchgesetzt, da es zum einen zerstörungsfrei ist und zum anderen nur eine zugängliche Oberfläche benötigt. Zudem kann es auch für Messungen im Unterwasserbereich verwendet werden.

Schallimpulse werden über einen Prüfkopf in den Stahl geleitet, sie durchlaufen die Wandung (Abb. 8.1), werden von ihrer Rückseite reflektiert und kehren als Rückwandecho zum Prüfkopf zurück (eine Unterscheidung der wasserseitigen und rückwärtigen Korrosion ist allerdings nicht möglich!).

Ein Teil der Impulse pendelt weiter zwischen den Oberflächen hin und her und erzeugt zusätzliche Rückwandechos. Bei bekannter Geschwindigkeit der Impulse (Schallgeschwindigkeit) ist die Impulslaufzeit ein Maß für die Wanddicke.

Korrosionsprodukte an der Rückwand werden nicht mitgemessen.

Für normale Messungen an Stellen ohne besondere Rauheit bzw. Korrosionsnarbenbildung haben sich einfache digitale Wanddicken-Messgeräte bewährt. Bei diesen Geräten ist die Laufzeitmessung beendet, sobald das erste Rückwandecho am Prüfkopf eintrifft.



Von der BAW entwickelter Spezialadapter



**Abb. 8.1:** Impuls-Echo-Methode mit Auswertung durch Zählvorgang

Prüfgeräte sind in der Regel mit einem getrennten Sender- und Empfängerschwinger (S/E-Prüfkopf) ausgestattet, die den Schallstrahl fokussieren. Die Anzeige der Messwerte ist digital. Die Geräte sind leicht und handlich, ihre Bedienung ist einfach. Auch Unterwasser-Messgeräte werden angeboten. Die Messwerte müssen dann von dem Taucher über Sprechfunk durchgegeben werden.

Für Messungen an stark vernarbten Oberflächen und auch insbesondere unter Wasser werden Universal-Ultraschallgeräte mit zusätzlicher Digitalanzeige eingesetzt. Diese Geräte sind mit einem Oszilloskopen ausgestattet, der die gesamte Rückwandeckfolge sowie auch mögliche Echos von inneren Materialfehlern darstellt. Als Prüfköpfe werden für Wanddickenmessungen in der Regel Stoßwellen-Prüfköpfe verwendet, die mit nur einem Schwinger arbeiten. Der Vorteil ist, dass die Messung der Wanddicke aus dem Abstand zwischen zwei Folge-Rückwandeckos durchgeführt werden kann und so der reine Laufweg in der Stahlwandung ermittelt wird.

Demgegenüber wird bei der Messung mit einem einfachen digitalen Wanddicken-Messgerät und S/E-Prüfkopf ein möglicher Spalt zwischen Prüfkopfoberfläche und Stahloberfläche mit gemessen, so dass bei größerer Narbigkeit eine größere als die reale Wanddicke angezeigt wird. Bei Unterwasser-Messungen verbleibt das Universal-Ultraschallgerät auf der Kaje, während der Taucher den Prüfkopf handhabt.

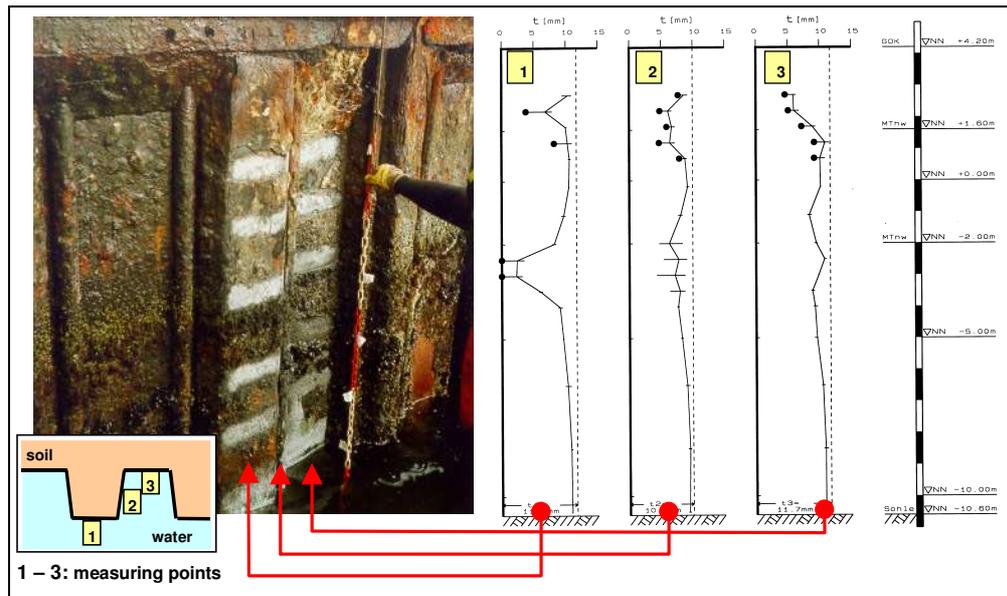
Bei den üblicherweise verwendeten Geräten bedingt die digitale Laufzeitählung eine gerätetechnische Messgenauigkeit von  $\pm 0,1$  mm. Die praktische Genauigkeit ist abhängig von der Qualifikation des Messpersonals und von der Messdurchführung.

Vor Beginn der Messungen muss das Ultraschallgerät an einer Stufenplatte mit vorgegebenen Stahldicken kalibriert werden. Während der Messungen ist das Gerät öfter zu überprüfen, um die Gewähr für eine einwandfreie Arbeitsweise zu erhalten.

Eine einwandfreie Ankopplung des Prüfkopfes an die Messstelle erfordert eine metallische Oberfläche. Haben sich bereits Korrosionsprodukte oder Anhaftungen gebildet, reicht eine Reinigung mit Bürste, Schaber oder Hammer in der Regel nicht aus. Am zweckmäßigsten wird dann die Oberfläche mit einer Schleifscheibe oder durch Strahlen gesäubert und von Unebenheiten befreit. Eine gute Ankopplung des Prüfkopfes über Wasser lässt sich durch Koppelpaste erreichen.

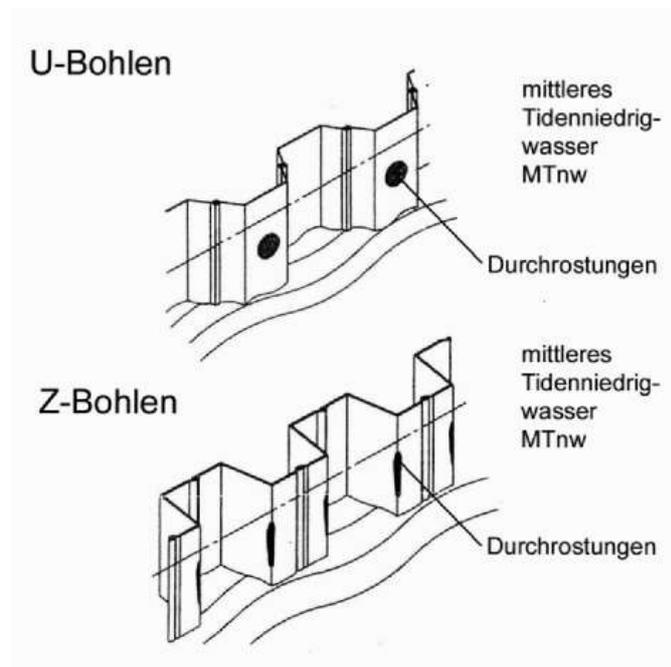
Bei der Durchführung einer Messkampagne werden üblicherweise Messstationen an Bohlen mit den stärksten Korrosionserscheinungen festgelegt (Abb. 8.2). Hier ist auf die sinnvolle vertikale Verteilung der Messstellen zu achten (Beschreibung in [5]).

So sollte bei Binnenwasserobjekten der Wasserwechselbereich und bei Seewasserobjekten der Niedrigwasserbereich dichter mit Messstellen belegt werden.



**Abb. 8.2:** Messstellenverteilung nach [5]

Bei U-Bohlen wird erfahrungsgemäß im Seewasserbereich der stärkste Abtrag im Bohlenrücken beobachtet, bei Z-Bohlen dagegen ist besonders der Übergangsbereich Steg/Rücken gefährdet (Abb. 8.3; siehe auch E35 der EAU [6]).



**Abb. 8.3:** Abtragsbereiche an Spundbohlen (aus E 35-2 der E 35 [6])

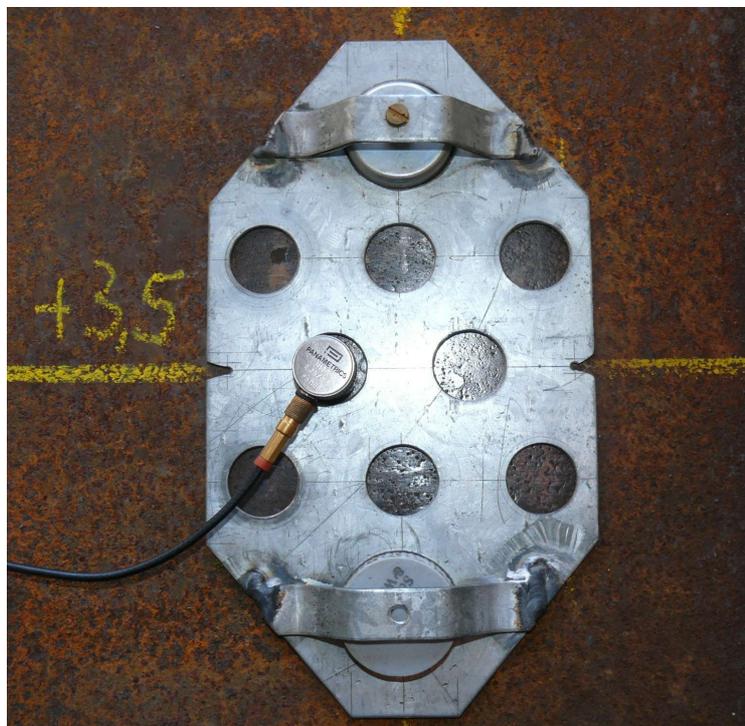
Zwischen den Messstationen reichen Stichprobenmessungen im Hauptkorrosionsbereich aus.

Die Anzahl der Messstationen und der Stichprobenmessungen muss der Größe des zu untersuchenden Wandabschnitts entsprechen, so dass vernünftige statistische Aussagen ermöglicht werden.

Für die Bewertung von Restwanddicken gilt, dass der mittlere Wanddickenabtrag relevant zur Beurteilung der Tragfähigkeitsminderung ist, die Maximalwerte weisen auf das Entstehen von Durchrostungen hin.

Eine Wanddickenmessung sollte daher sowohl Mittel- als auch Maximalwerte der Abrostung erfassen, jede Messstelle muss also aus mehreren Messpunkten bestehen.

Bei Messprogrammen mit Nullmessung hat sich eine Schablone (Abb. 8.4) bewährt, die mit Magneten in ihrer Stellung gehalten wird und Aussparungen für das Ansetzen des Prüfkopfes besitzt.



**Abb. 8.4:** Messschablone

Abrostungsformen mit ihren typischen Häufigkeitsverteilungen sowie eine Methode der statistischen Auswertung der maximalen Abrostungsraten zur Abschätzung des Zeitpunktes der ersten Durchrostungen werden in [5] beschrieben.

## 8.3 Potentialmessungen

### 8.3.1 Allgemeines

An einem bestehenden, zu beurteilenden oder zu schützenden Bauwerk kann aus den freien Korrosionspotentialen auf die Korrosionsgeschwindigkeit, den Schutzstrombedarf und die Gleich- oder Ungleichförmigkeit der Korrosion qualitativ geschlossen werden. Die Ableitung von zahlenmäßigen Angaben ist jedoch nicht möglich.

Die Potentiale von Baustahl für allgemeine Verwendung liegen meist innerhalb folgender Bereiche:

- Süßwasser: -430 bis -530 mV/Ag\*
- Meerwasser: -530 bis -600 mV/Ag\*

\* Silber/Silberchloridelektrode

Die mehr positiven Werte deuten darauf hin, dass die korrodierenden Oberflächen mit Deckschichten aus Korrosionsprodukten überzogen sind. Mit deren zunehmender Dicke verringert sich die Korrosionsgeschwindigkeit bzw. der Schutzstrombedarf.

Die mehr negativen Werte weisen auf eine hohe (Anfangs-) Korrosionsgeschwindigkeit oder das Fehlen sauerstoff-diffusionshemmender Deckschichten hin. Ein hoher Schutzstrombedarf ist zu erwarten.

Aus Potentialunterschieden lassen sich korrosionsverstärkende Elementbildungen erkennen. Ursachen dafür sind z. B. der Tidenhub, spontane Polarisierungen oder Werkstoffunterschiede bis hin zu hochlegierten, nichtrostenden Stählen (im Folgenden Edeltähle genannt) oder Buntmetallen.

Anodische Bereiche können zumindest während der Inbetriebnahmephase deutlich mehr Strom benötigen als kathodische. Darauf muss bei entsprechend ausgeprägter Elementbildung Rücksicht genommen werden, indem die Anodenverteilung bzw. Bemessung der Schutzstromgeräte oder beide angepasst werden. Nach einigen Betriebsjahren sind Elemente, die nicht auf Kombination Baustahl/Chromnickel-Stahl u.ä. beruhen, durch Deckschichtenbildung beseitigt. (Galvanische) Elemente auf Basis Baustahl/Chromnickel-Stahl (oder Baustahl/Buntmetall) werden sofort nach Schutzstromunterbrechung wieder aktiv, unabhängig von der Betriebsdauer des kathodischen Schutzes.

Streuströme lassen sich durch schnell schwankende Potentiale erkennen.

### **8.3.2 Durchführung der Potentialmessungen**

Potentialmessungen in diesem Sinne werden stichprobenartig über das Bauwerk verteilt ausgeführt.

Deuten die Messungen durch signifikante Streuungen auf Elementbildungen hin, muss speziell auf diese untersucht werden (in Meerwasser gelten Potentialunterschiede von wenigen mV bereits als bedeutsam!).

Dazu werden die Potentialmessungen rasterförmig (z. B. auf einer Fläche von 1 m<sup>2</sup> bei einer Spundwand) über das gesamte Bauwerk ausgeführt. Dabei muss sehr genau gearbeitet werden, da es auf geringe Potentialunterschiede von wenigen mV ankommen kann. Aus den Differenzen wird auf die örtliche Verteilung von anodischen und kathodischen Oberflächen geschlossen. Die Auswertung erfolgt am besten mittels Farbgrafik oder dreidimensionalem Diagramm.

### **8.4 Untersuchung des Schutzstrombedarfs**

Der Schutzstrombedarf kann nach dem in Abschnitt 7.3.3.1 beschriebenen Verfahren (Einspeiseversuch) ermittelt werden. Im Detail kann dabei zwischen Versuchen an Fremdstromanlagen (Abschnitt 7.3.3.2) und galvanischen Schutzanlagen (Abschnitt 7.3.3.3) unterschieden werden.

#### **Literatur:**

- [1] DIN EN ISO 8501: Vorbereitung von Stahloberflächen vor dem Auftragen von Beschichtungstoffen
- [2] DIN EN ISO 4628-3; Beurteilung von Beschichtungsschäden – Bewertung des Rostgrades
- [3] Binder & Graff: Mikrobiell verursachte Korrosion an Stahlbauteilen; Werkstoffe und Korrosion 46 (1995) 639-648
- [4] Final Report „Prevention of accelerated low-water-corrosion on steel piling structures“ (2001) EUR 20043 EN
- [5] Alberts & Heeling: Wanddickenmessungen an korrodierten Stahlspundwänden – statistische Datenauswertung; Mittbl. d. BAW 75 (1997) 77-94
- [6] Empfehlungen des Arbeitsausschusses Ufereinfassungen (EAU) - E 35, Korrosion bei Stahlspundwänden und Gegenmaßnahmen

## **9. Auslegung eines Korrosionsschutzsystems**

### **9.1 Allgemeine Planungsgrundsätze**

Bereits während der ersten Planungsphase einer neuen wasserbaulichen Anlage sollten Festlegungen über Notwendigkeit und Art eines Korrosionsschutzes getroffen werden, da dieser nicht nur die bauliche Gestaltung, sondern auch die mögliche Lebensdauer sowie den späteren Restwert der Anlage entscheidend beeinflussen kann. Die Entscheidung über diese Fragen hat bereits Auswirkungen auf die wirtschaftlichen Vergleiche möglicher Alternativlösungen.

Konstruktionsentwürfe, die rechtzeitig die Belange der vorgesehenen Korrosionsschutzmaßnahmen berücksichtigen, können einerseits die Wirksamkeit des Schutzes wesentlich erhöhen und andererseits die Investitions-, Unterhaltungs- und Betriebskosten der Anlage entscheidend verringern.

Wird dagegen den Belangen des Korrosionsschutzes in den anfänglichen Planungsphasen nicht genügend Rechnung getragen, so ist zu erwarten, dass daraus - zumindest beim aktiven kathodischen Korrosionsschutz (KKS) - Mehrkosten und Funktionseinschränkungen resultieren. Unter Umständen kann dann der KKS sogar technisch oder wirtschaftlich unverträglich werden.

Ob ein Korrosionsschutz notwendig wird, ergibt sich aus:

- der voraussichtlichen Nutzungsdauer der Anlage,
- der bis dahin zu erwartenden Abrostung (getrennt nach Flächen- und Lochkorrosion) und
- der Beeinträchtigung der Konstruktion durch diese Abrostung.

Die Belastung aus Korrosion kann durch Auswertung der Ergebnisse von Feldmessungen oder der langfristig vor Ort ermittelten Abrostungsraten an bestehenden Bauwerken abgeschätzt werden. Darüber hinaus sind aber auch zukünftig wirksame Einflüsse zu beachten, welche die bestehenden Korrosionsbedingungen verändern.

Durch Ausbildung von Makroelementen können sich z.B. Zonen mit vervielfachten Korrosionsraten einstellen.

Wegen der grundlegenden Bedeutung des Korrosionsschutzes für die Ausbildung und Gestaltung der Bauwerke sowie für deren Kosten, Lebensdauer und Rentabilität ist anzustreben, dass alle Grundsatzuntersuchungen und Feldmessungen frühzeitig, spätestens aber bei Beginn der detaillierten Entwurfsbearbeitung abgeschlossen sind.

Die Lebensdauer jedes Teilbauwerkes sollte die geplante Nutzungsdauer (Verkehrsalter, vgl. EAU, E 46 [1]) übersteigen.

Bei Stahlkonstruktionen kann die erforderliche Lebensdauer erreicht werden durch:

- Überdimensionierung,
- passiven Korrosionsschutz durch Beschichtung,
- aktiven Korrosionsschutz durch kathodischen Schutz mit Fremdstrom oder galvanischen Anoden,
- kombinierten Korrosionsschutz durch passiven und aktiven Schutz.

Ein KKS ermöglicht eine beliebige Verlängerung der Lebensdauer, wenn eine entsprechende bauliche Unterhaltung oberhalb der Mittelwasserlinie vorausgesetzt wird. Damit entfallen dann auch die Unsicherheiten und Schwierigkeiten in der Abschätzung der Korrosionsraten und der möglichen Nutzungsdauer.

Bei Stahlbetonkonstruktionen, die als Alternativen zu bauseitigen reinen Stahlkonstruktionen bei der Angebotswertung einbezogen werden, ist zu berücksichtigen, dass es keinen absolut rissfreien, allen Korrosionsangriffen widerstehenden Beton gibt – vor allem nicht bei Rammelementen. Trotz ausreichender Betonüberdeckung (s. EAU, E 21 und E 72 [1]) können Risse ab einer gewissen Weite zu Korrosion an der Bewehrung führen. Der Einsatz von aktiven oder passiven Schutzmaßnahmen sollte also auch hier erwogen werden (KKS, Beschichtung etc.).

Wird auf spezielle Korrosionsschutzmaßnahmen gänzlich verzichtet, so muss gewährleistet sein, dass die statisch erforderlichen Wanddicken bzw. Querschnitte an jeder Stelle des Bauwerks über dessen gesamte Nutzungsdauer vorhanden sind. Dieses lässt sich z. B. durch Überbemessung erreichen. Eine solche Methode findet aber ihre wirtschaftlichen und fertigungstechnischen Grenzen bei höher beanspruchten Querschnitten und größerer oder nicht genügend bekannter Abrostung. Das gilt insbesondere für Schlossbereiche in Spundwänden und bei durchgehend geschweißten Stahlprofilen.

Bei passivem Schutz durch eine Beschichtung ist nach dem heutigen Kenntnisstand davon auszugehen, dass die Gesamtfläche der Beschichtung im Allgemeinen nicht eine Lebensdauer erreicht, die der Nutzungsdauer des Bauwerks entspricht. Daher muss geprüft werden, ob das Bauwerk allein mit passivem Schutz über die geforderte Nutzungsdauer erhalten werden kann.

Die Beeinträchtigung der Konstruktion durch eine mögliche Korrosion ist dabei zu berücksichtigen. Während die verhältnismäßig intensive Korrosion in den Fehlstellen einer Beschichtung in einem Fall statisch belanglos sein mag, so kann sie in einem anderen Fall das Bauwerk durch Perforation gefährden. Das gilt vor allem dann, wenn z.B. die Hinterfüllung herausgespült oder bei Hohlprofilen durch Wasseraustausch beidseitige Korrosion hervorgerufen wird. In besonderem Maße gilt dies für Bauelemente mit einer Dichtfunktion, wie z. B. Hochwasserschutz.

Die Lebensdauer einer Beschichtung kann durch Schutz gegen mechanische Schäden aus Schiffsbetrieb und Eisgang wesentlich erhöht werden, z.B. durch entsprechende Profilformen bei geschlossenen Spundwänden, durch vorgebaute Reibehölzer, die bis unter MTnw reichen, und dergleichen.

Beim passiven Korrosionsschutz ist vor Teilbeschichtungen, z.B. nur der Zone unterhalb der Niedrigwasserlinie, zu warnen, da bei der Korrosion durch Makro-Elementbildung die Hauptkorrosionszone lediglich in die benachbarten, unbeschichteten Bereiche verschoben würde.

Eine Korrosionsminderung durch Teilbeschichtung ist nur dann zu erreichen, wenn nicht nur die korrodierende anodische Zone, sondern auch die kathodische Zone beschichtet wird, die zwar selbst nicht oder nur wenig korrodiert, aber die Korrosionsgeschwindigkeit in der anodischen Zone bestimmt (Flächenregel).

Technisch und wirtschaftlich sinnvoll können Teilbeschichtungen auch in Verbindung mit kathodischem Schutz sein. Die Beschichtung muss dann aber zumindest bei Neubauten von Oberkante Stahlprofil bis ca. 2,00 m unter MTnw reichen.

Für Bauwerke mit längerer Nutzungsdauer kommt in See- und Brackwasser sowie in aggressivem Süßwasser nur der kombinierte Schutz von passivem und aktivem Korrosionsschutz in Betracht.

Bei passivem und kombiniertem Schutz, unabhängig davon, ob der aktive Schutz sofort vorgesehen oder erst später eingebaut wird, sollte im Allgemeinen ein Beschichtungssystem mit Zinkstaub-Grundbeschichtung nach DIN EN ISO 12944 [2] gewählt werden.

Wird die Installation eines KKS erst für einen späteren Zeitpunkt vorgesehen, so muss diese jedoch bereits bei der Planung berücksichtigt werden. Dabei sind alle damit zusammenhängenden, konstruktiven Auswirkungen auf das Bauwerk, wie die Aufstellung von Geräten, Halterungen für die Anodenkonstruktionen, Verkabelungen, durchgehende elektrische Leitverbindungen innerhalb des Bauwerks usw. zu beachten.

Außerdem ist in einem solchen Fall die Korrosion an den besonders gefährdeten Bauteilen sorgfältig und langfristig zu beobachten, wobei zweckmäßig, bei Teilbeschichtungen zwingend notwendig, Nullmessungen der Wanddicken an Referenzbohlen oder -pfählen durchzuführen sind. Durch spätere Nachmessungen in blanken Bereichen oder an Fehlstellen in der Beschichtung können dann die Korrosionsraten ermittelt und die Abrostung hochgerechnet werden. Damit lässt sich der Zeitpunkt abschätzen, zu dem spätestens der KKS nachgerüstet werden muss.

Nach dem heutigen Kenntnisstand ist bei Stahlwasserbauten ein kathodischer Schutz im Allgemeinen nur in Kombination mit nachweislich geeigneter Beschichtung wirtschaftlich. Obwohl Beschichtungen teuer sind und im Laufe der Zeit teilweise wirkungslos werden, verhält sich der kombinierte Schutz in der Regel dennoch deutlich kostengünstiger als der ausschließliche kathodische Schutz unbeschichteter Stahlflächen.

Im letzteren Fall ergeben sich außerordentlich hohe Kosten für Strom und Anoden bei Fremdstromanlagen oder für Anodenersatz bei galvanischen Schutzverfahren. Der kathodische Schutz unbeschichteten Stahls sollte daher nur als Notlösung und nicht planmäßig in Betracht gezogen werden.

Eine Beschichtung kann auch losgelöst von wirtschaftlichen Erwägungen allein aus technischen Zwängen notwendig werden. Dies gilt immer dann, wenn es bei schwierigen geometrischen Verhältnissen im Brack- und Süßwasserbereich oder bei drohender Beeinflussung von benachbarten Anlagen erforderlich ist, eine ausreichende Stromverteilung bei geringen Stromdichten zu gewährleisten. Probleme dieser Art lassen sich ohne fachkundige Hilfe oft nicht erkennen.

### **9.1.1 Betriebsbedingungen des Bauwerkes**

Wichtig für die Auslegung der kathodischen Korrosionsschutzanlage sind die Betriebsbedingungen des Bauwerkes. Dabei sind die Stand- und Einbauorte von KKS-Bauteilen davon abhängig, ob passierender und/oder ruhender Schiffsverkehr gegeben ist, wie mechanische Einflüsse auf das zu schützende Bauwerk wirken (Treibgut, Eisgang, Sandschliff, Schiffsberührung, Wellenschlag).

Es ist auch darauf zu achten, dass notwendige Überprüfungen und Überwachungen der kathodischen Korrosionsschutzanlage ohne Eingriff und Störung des Betriebsablaufes erfolgen können, z.B. durch den Einsatz einer zentralen Überwachungs- und Steuerungsanlage.

### **9.1.2 Zu schützende Oberflächen**

Prinzipiell sind alle mit dem Wasser oder Boden in Berührung stehenden Oberflächen gegen Korrosion zu schützen. Dazu gehören z.B. Stahlpundwände, Pfahlbauwerke aus Stahl. Präventiv sollten auch Stahlbetonflächen kathodisch korrosionsgeschützt werden, da eine Rissbildung im Beton prinzipiell nicht ausgeschlossen werden kann. Damit wird durch das Eindringen von Chloriden bis zur Stahlarmierung die Passivierungsschicht aufgebrochen und es kommt zu erheblicher Korrosion der Armierung. Die sich dabei bildenden voluminösen Korrosionsprodukte können zu einem Abplatzen der Betondeckung führen, wodurch weitere Armierungsflächen dem Chloridangriff ausgesetzt werden.

### **9.1.3 Einfluss der Beschichtung**

Eine Beschichtung der kathodisch korrosionsgeschützten Flächen als passiver Korrosionsschutz reduziert prinzipiell den Schutzstrombedarf der Anlage und wirkt sich daher positiv für die Gesamtanlage aus.

Die Schutzstromdichten sind entsprechend geringer und damit erhöht sich auch der Schutzbereich einer einzelnen Anode, d.h. der Abstand zwischen zwei Anoden kann eventuell größer gewählt werden (geringere Anzahl von Anoden, Anodenhaltern, Kabelverbindungen).

Bei der Wahl der Beschichtungen ist auf die Potentialverträglichkeit beim Einsatz der kathodischen Korrosionsschutzanlage zu achten und es wird empfohlen, entsprechend geprüfte und zugelassene Beschichtungssysteme zu verwenden.

### **9.1.4 Schutzstromdichten**

Die Schutzstromdichten der zu schützenden Flächen sind abhängig von den verschiedenen Zonen (s. Tabelle 7.4 in Abschnitt 7.3.3). Daher sind bei der Berechnung des spez. Schutzstroms pro Meter Fläche diese verschiedenen Zonen in den verschiedenen Tiefen zu beachten und zu berechnen.

Im Wesentlichen wird bei der Definition der Schutzstromdichten von der Schutzstromdichte von blankem Stahl ausgegangen und mit einer prozentualen Fehlstellenrate, die von der Beschichtung und der geplanten Lebensdauer abhängig ist, multipliziert und so die erforderliche Schutzstromdichte bestimmt.

### 9.1.5 Wasserseitige Einflussgrößen

In natürlichen Wässern sind Salze, vorwiegend Chloride aber auch Sulfate und Bikarbonate gelöst. Weitere Anionen spielen im Allgemeinen nur eine untergeordnete Rolle. An Kationen herrschen Natrium, Kalium, Calcium und Magnesium vor. Der Salzgehalt von natürlichen Wässern liegt zwischen nahezu 0 % bei Quellwassern aus Plutoniten („Urgestein“) und ca. 3,5 % im Meerwasser. In besonderen Fällen treten noch höhere Werte auf.

Besonders zu beachten sind durch Einleitungen verunreinigte Wässer und z. B. Wässer aus der Tiefe (Mineralquellen oder Bergbau). In diesen Fällen können zusätzliche Anionen und Kationen vorhanden sein oder ungewöhnlich hohe Konzentrationen der eingangs genannten.

Vom Salzgehalt des Wasser hängt seine spezifische Leitfähigkeit (gemessen bei 20 °C in (µS/cm) bzw. sein spezifischer Widerstand (gemessen in Ω x cm oder Ω x m) ab. Werte sind in Tabelle 7.5, Abschnitt 7.4.4 aufgelistet.

Aus der Leitfähigkeit ergeben sich wichtige Folgerungen für die Planung von Korrosionsschutzanlagen wie Aufwand für die Anodenanlage und die zu erwartende Stromverteilung.

Die Leitfähigkeit ist abhängig von der Temperatur und wird deshalb als „spezifische Leitfähigkeit“ bei Bezugstemperatur (meistens 20 °C) gemessen. Ihr Temperaturkoeffizient liegt bei natürlichen Wässern zwischen 2,0 und 2,5 % / °C. Der formelmäßige Zusammenhang lautet:

$$\kappa_t = \kappa_{20} [1 + \alpha (t - 20)] \quad \text{Gl. 9.1)}$$

$\kappa_t$  = Leitfähigkeit bei beliebigem Temperaturwert t des Elektrolyten

$\kappa_{20}$  = Spezifische Leitfähigkeit bei t = 20 °C

$\alpha$  = Temperaturkoeffizient ca. 2,0 bis 2,5 % / °C

Damit halbiert ein Wasser bei Abkühlung von 20 °C im Sommer auf 0 °C im Winter seine Leitfähigkeit nahezu. Das hat wesentliche Auswirkungen auf die Stromabgabe von Schutzanlagen und auf die Verteilung des Schutzstroms.

Zur Durchführung von Leitfähigkeitsmessungen siehe Abschnitt 7.4.

Die Korrosionsgeschwindigkeit ist abhängig vom Sauerstoffgehalt des Elektrolyten. Er fällt mit steigender Temperatur von 14,6 mg/l bei 0 °C auf 9,2 mg/l bei 20 °C bei gesättigtem Süßwasser. Trotzdem nimmt die Korrosion mit steigender Temperatur nicht ab, da die Diffusions- und Reaktionsgeschwindigkeit des Sauerstoffs ansteigt, was das Weniger an Sauerstoff überkompensiert.

In diesem Zusammenhang muss beachtet werden, dass auch bei geringem Sauerstoffgehalt die Korrosionsgeschwindigkeit kaum beeinflusst wird. Erst wenn er sich Werten unter 2 mg/l nähert, kann mit bedeutsamer Verringerung der Korrosionsgeschwindigkeit gerechnet werden.

Wichtiger als der Gehalt an Sauerstoff ist dessen Diffusion aus dem Elektrolyten an den Stahl, wobei Strömungsgeschwindigkeiten, Turbulenzen und Durchlässigkeit von Böden, und bei bestehenden Bauwerken auch Bewuchs, Deckschichten aus Korrosionsprodukten oder Beschichtungsreste von Bedeutung sind.

Die Wirksamkeit des kathodischen Schutzes und die Funktion von Schutzanlagen werden von Calcium-, Magnesium- und Phosphat-Ionen beeinflusst. Ohne die beiden erstgenannten Ionen ist ein effektiver kathodischer Schutz kaum realisierbar, da sich keine kathodischen Deckschichten bilden. Das wäre z. B. der Fall in einem Flusswasser ohne oder mit sehr geringer Wasserhärte, aber mit deutlichen Gehalten an Kohlensäure und Sauerstoff, oder in einem Moorwasser. Normale Fluss- und Grundwässer enthalten jedoch ausreichende Mengen der benötigten Kationen.

In verunreinigten Wässern können Phosphat-Ionen aus kommunalen Abwässern vorhanden sein. Diese bilden ab kritischen Gehalten dichte Deckschichten auf Zink- und Aluminiumanoden, die die Stromabgabe ganz oder teilweise verhindern. Von welcher Konzentration an Phosphate stören, hängt von der Anwesenheit und Menge anderer Anionen, wie z. B. Chloriden, Sulfaten und Nitraten, und der spezifischen Stromdichte, das heißt der Belastung der Anoden ab. Hohe Chloridgehalte wie im Meerwasser machen den Einsatz der genannten Opferanoden meistens unbedenklich, in Brackwässern ist aber schon Vorsicht geboten. Die erforderlichen Messparameter sind in Tabelle 8.2, Abschnitt 8.2.1 aufgelistet. Ferner ist zu entscheiden, ob mehrere Wasserproben aus unterschiedlicher Tiefe, bei unterschiedlichen Wasserständen und Wasserführungen im Sommer oder Winter für eine sinnvolle Beurteilung erforderlich sind.

#### **9.1.6 Potentiale und Potentialbegrenzung**

Der kathodische Korrosionsschutz wirkt durch die Zuführung von freien Elektronen in das zu schützende Bauwerk und bewirkt damit eine Potentialabsenkung des Phasengrenzpotentials des Stahls.

Das allgemein anerkannte Kriterium für einen ausreichende Korrosionsschutz ist ein Ausschaltpotential von -850mV gegen Cu/CuSO<sub>4</sub>-Elektrode oder -950mV gegen Cu/CuSO<sub>4</sub>-Elektrode bei Vorhandensein von sulfatreduzierenden Bakterien.

Beschichtungen neigen jedoch dazu, unter dem Einfluss von kathodischem Korrosionsschutz Blasen zu bilden. Demzufolge werden Beschichtungssysteme speziell für den Einsatz für kathodisch korrosionsgeschützte Anwendungen angepasst, getestet und zugelassen.

Es muss jedoch sichergestellt werden, dass eine kathodische Korrosionsschutzanlage auf ein Ausschaltpotential von -1150mV gegen Cu/CuSO<sub>4</sub> begrenzt wird, um eine kathodische Blasenbildung oder Unterwanderung zu vermeiden.

#### **9.1.7 Lebensdauer der Anoden**

Die Lebensdauer der Anoden richtet sich prinzipiell nach der geplanten Lebensdauer der Anlage. Diese Lebensdauer übersteigt jedoch meistens die realistische Lebensdauer der Anoden unter Berücksichtigung der mechanischen Einflüsse wie Strömung, Wellenschlag oder Eisgang oder Installierbarkeit auf Grund von großen benötigten Anodenmassen beim Einsatz von Opferanode.

Daher wählt man in der Praxis 20 Jahre Lebensdauer beim Einsatz von Fremdstromanoden und eine entsprechend angepasste Lebensdauer bei Opferanoden.

Da diese Anoden während der Lebensdauer der Anlage ausgetauscht werden müssen, ist entsprechend darauf zu achten, dass dieser Austausch mit relativ geringem Installationsaufwand möglich ist, was speziell bei Opferanoden nur schwer zu realisieren ist.

**Literatur:**

- [1] Empfehlungen des Arbeitsausschusses Ufereinfassungen (EAU) – E 35, Korrosion bei Stahlspundwänden und Gegenmaßnahmen
- [2] DIN EN ISO 12944: Korrosionsschutz von Stahlbauten durch Beschichtungssysteme

## **10. Schutzverfahren mit galvanischen Anoden**

### **10.1 Allgemeine Grundsätze**

Die Anwendung der kathodischen Schutzverfahren mit galvanischen Anoden ist nicht an bestimmte Bauwerksformen gebunden. Da die Schutzbereiche der einzelnen Anoden lediglich ihre nähere Umgebung erfassen, können durch Aneinanderreihungen der Anoden beliebig gestaltete Bauwerke geschützt werden. Galvanische Anoden werden vorwiegend für Objekte mit geringem Schutzstrombedarf und niedrigen spezifischen Boden- und Wasserwiderständen eingesetzt. Sie sind von Interesse, wenn eine Stromversorgung nicht oder nur sehr kostenaufwendig zu installieren ist.

Während bei größeren und flächig ausgedehnten Objekten wegen der allgemein größeren Reichweite der Anoden und der übersichtlicheren Funktionsüberwachung der Einbau von Fremdstromanlagen günstiger ist, eignen sich Schutzverfahren mit galvanischen Anoden insbesondere für kleinere, verwinkelte und aufgelöste Bauwerksformen sowie für schwimmende und dockbare Anlagen. Die Schutzflächen sollten gut zugänglich sein, damit die Montage der Anoden und die notwendigen Kontrollmessungen am Einbauort unbehindert vorgenommen werden können.

Wegen des geringen Installationsaufwandes lassen sich die galvanischen Anoden auch für den nachträglichen Einbau an größeren Schutzobjekten vorteilhaft einsetzen. Dies gilt ebenso, wenn eine bestehende Fremdstromanlage in abgeschotteten Bereichen mit galvanischen Anoden ergänzt oder nur bestimmte Bauwerksbereiche wie z. B. Zonen verstärkter Korrosion geschützt werden sollen.

Galvanische Schutzverfahren sind bevorzugt anzuwenden, wenn durch die Installation einer Fremdstromanlage eine Streustrombeeinflussung benachbarter oder kreuzender Bauwerke zu erwarten ist bzw. durch spezielle Anlagenteile aus Kupfer- oder Chromnickelstahllegierungen das Stahlbauwerk geschädigt werden könnte.

Besonders korrosionsempfindliche Bauwerke aus Stählen höherer Festigkeit, bei denen eine vorgesehene Fremdstromanlage erst zu einem späteren Zeitpunkt in Betrieb genommen wird, lassen sich zwischenzeitlich mit galvanischen Anoden schützen. Bei längerfristigem Ausfall einer bestehenden Fremdstromanlage kann durch den provisorischen Einbau galvanischer Anoden das Bauwerk vorübergehend vor Korrosionsschäden bewahrt werden.

Schutzanlagen mit galvanischen Anoden lassen sich durch entsprechende Auswahl des Anodenwerkstoffes, der Anodenanzahl und der Anodenform leicht an die örtlichen Korrosionsbedingungen und an den vorhandenen Elektrolyten anpassen.

In Sonderfällen, wie z. B. an gut beschichteten Rohrleitungen in niederohmigen Böden und Wässern, lassen sich mit Einzelanoden auch größere Streckenabschnitte erfolgreich schützen.

Im Süßwasser und im Erdboden sollten nur Anodenmetalle mit in Bezug zu Stahl großer Potentialdifferenz (Magnesiumanoden) eingesetzt werden. Im Meerwasser und stärker leitfähigen Brackwässern reichen auch Anoden mit einer geringen Potentialdifferenz wie Aluminium- oder Zinkanoden aus. Bei Anwesenheit von Phosphaten in Elektrolyten ist gegebenenfalls von der Verwendung der Aluminium- und Zinkanoden abzusehen.

Die Anoden werden direkt auf die Unterwasserflächen des Schutzobjektes gesetzt und so angeordnet, dass sich ein möglichst gleichmäßiges Schutzpotential ausbilden kann. Schattenwirkungen, die infolge Abschirmung des Schutzstromes durch Konstruktionsteile und an den Ecken und Kanten entstehen, sind durch zusätzlich installierte galvanische Anoden auszugleichen. Dies gilt auch für Öffnungen im Bauwerk und in dem Umgebungsbereich von Einleitungen, in denen höhere korrosive Belastungen erwartet werden.

Galvanische Anoden sind bevorzugt im Bereich örtlicher Aussteifungen anzubringen. Installationen in hochbeanspruchten Bereichen oder jenen, die hohen Dauerbelastungen (Stöße, Nähte) ausgesetzt sind, sollten nicht erfolgen.

Die Anoden sind geschützt anzubringen, um Beschädigungen durch die Bewegungen der Wasserfahrzeuge und durch See- und Eisgang zu vermeiden. Sie sollten wenn möglich angeschweißt werden. Müssen die Anoden mit Hilfskonstruktionen angeschraubt oder in Halterungen eingesetzt werden, ist darauf zu achten, dass sie metallisch leitend mit dem Bauwerk verbunden sind.

Erweist es sich als notwendig, die Ausschaltpotentiale zu überprüfen, muss der Anschluss trennbar über Kabel- und Messstellen geführt werden.

Als Anodenwerkstoff in Verbindung mit Stahl eignen sich speziell aktivierte Legierungen der Grundmetalle Aluminium, Zink und Magnesium.

Der sich um jede Anode ausbildende Spannungstrichter führt dazu, dass die Bauwerksoberfläche in der unmittelbaren Nähe der jeweiligen Anode mit einem hohen Schutzstrom beaufschlagt wird. Bei Neuanlagen sollte deshalb zumindest dieser Bereich mit einer, mit dem kathodischen Korrosionsschutz verträglichen Beschichtung ausreichender Schichtdicke versehen werden. Sind an vorhandenen Bauwerken die zu schützenden Flächen bereits mit einer für den kathodischen Schutz gegebenenfalls nicht geeigneten Beschichtung bedeckt, müssen im Nahbereich der Anoden besondere Maßnahmen getroffen werden, um eine nachteilige Beeinflussung der Beschichtung und einen unnötig hohen Abtrag des Anodenmaterials zu vermeiden.

Über in die Anoden eingegossene Halterungen lassen sich auch vor allem bei Magnesiumanoden durch die Einhaltung von Mindestabständen Überpotentiale vermeiden. Solche aus unlegiertem Baustahl sollten feuerverzinkt und passiv geschützt sein.

Eine Schutzanlage mit galvanischen Anoden lässt sich in kurzer Zeit installieren. Sie ist mit der Herstellung der leitenden Verbindung von den Anoden zum Bauwerk sofort wirksam. Während der Betriebszeit erfordert die Anlage außer gelegentlichen Kontrollmessungen keinen Wartungsaufwand. Die Schutzwirkung endet mit dem Abtrag der Anoden.

Der Anodeneinbau ist von Fachfirmen zu planen und zu überwachen.

## 10.2 Anodenlegierungen, Anodenformen

### 10.2.1 Allgemeines

Die Wirksamkeit der galvanischen Anoden beruht auf der Elementbildung zwischen dem Baustahl und dem elektronegativeren Anodenwerkstoff, der korrodiert und dadurch den schützenden Gleichstrom liefert. Bestehen aus speziellen Metalllegierungen, deren Arbeitspotential sich hinreichend negativ zum erforderlichen Schutzpotential des Stahles im natürlichen Wasser einstellt. Die Anodenmetalle Zink, Aluminium und Magnesium erfüllen diese Anforderungen. Ihre Potentialdifferenz zum Baustahl beträgt

bei Zink	0,25-0,30 mV,
bei Aluminium	0,30-0,37 mV, und
bei Magnesium	0,45-0,75 mV.

Die Potentialdifferenz ist das Maß für die Treibspannung, die den kontinuierlichen Abfluss des Schutzstromes aufrechterhält.

Die Schutzwirkung der galvanischen Anoden ist entsprechend ihrer Stromabgabe mit einem äquivalenten Materialabtrag verbunden. Der Anodenwerkstoff löst sich auf und die freigewordenen Elektronen fließen über die elektrisch leitende Verbindung in den Baustahl hinein (siehe Gleichung 5.1).

Der Strominhalt einer Anode ist also abhängig von der Masse und der Wertigkeit des Anodenmetalls. Infolge Eigenkorrosion, die auf kathodischen Nebenreaktionen und anderen Vorgängen beruht, wird die praktische Stromausbeute teilweise erheblich reduziert.

Das Metall Zink kann in reiner Form für die Herstellung der Anoden verwendet werden. Bei den Metallen Aluminium und Magnesium ist das nicht möglich. So unterliegt das reine Aluminium einer natürlichen Passivierung, die bewirkt, dass sowohl in der Luft als auch im Wasser auf den Metalloberflächen schwerlösliche Verbindungen (Oxide, Carbonate, Phosphate) entstehen. Durch solche isolierenden Deckschichten können die elektrochemischen Abläufe gemindert bzw. sogar unterbunden werden. Reines Magnesium baut im Wasser übermäßig schnell ab und setzt dabei größere Mengen Wasserstoffgas frei.

Mit Hilfe von Legierungselementen lassen sich aber die nachteiligen Materialeigenschaften zurückdrängen. Durch Zugabe geringer Mengen bestimmter Elemente kann z. B. bei Zink eine Kornverfeinerung erreicht werden, wodurch die Abtragung der Anoden gleichmäßiger wird, kann insbesondere bei Aluminium das Anodenmaterial aktiviert und bei Magnesium die Eigenkorrosion und damit der übermäßig schnelle Abbau verringert werden.

Wenn sich trotzdem bei Anwesenheit bestimmter Wasserinhaltsstoffe harte Deckschichten ausbilden, sind diese von den Anodenoberflächen planmäßig kontinuierlich zu entfernen.

Grundsätzlich können die Anoden in jeder beliebigen Form hergestellt werden. Wegen der schnelleren Verfügbarkeit und Austauschbarkeit empfiehlt es sich jedoch, nur Anoden in handelsüblichen Abmessungen zu verwenden. In die Anoden sind werkseitig stählerne, feuerverzinkte Halterungen (Stäbe, Rundeisen) einzubetten, die zur Befestigung dienen.

## 10.2.2 Anoden

### Zink-Anoden

Für die Anodenherstellung darf nur hochreines Zink mit sehr niedrigem Eisengehalt verwendet werden. Infolge Zumischung von 0,15 M% Cadmium und 0,5 M% Aluminium wird eine Kornverfeinerung und damit ein gleichmäßigerer Materialabtrag erzielt. Eine stärkere Anreicherung mit Cadmium ist nur erforderlich, wenn der Eisengehalt im Anodenwerkstoff 0,0014 Prozent überschreitet.

Die Eigenkorrosion der Zinkanoden ist relativ gering. Mit steigenden Wassertemperaturen nimmt ihre Treibspannung ab und die Anodenoberflächen werden passiviert. In salzarmen und/oder in verunreinigten Wässern sowie unter schwacher Belastung entstehen auf den Oberflächen schwerlösliche Deckschichten. Poröse Deckschichten behindern die Schutzstromabgabe jedoch nicht, allein die dünnen und dichten Zinkphosphatschichten isolieren die Anoden.

Im Süßwasser und im Erdboden können die Potentiale ansteigen, wodurch die Schutzwirkung aufgehoben wird.

### Werkstoff

Zinkanoden werden in zwei Legierungen mit den Werkstoffnummern 2.2301 und 2.2302 geliefert. Wegen des geringeren Gehaltes an Cadmium (0,004 %) sollte vorzugsweise der Werkstoff Nr.2.2302 verwendet werden.

Dichte:	7,1 g/cm <sup>3</sup>
Theor. Strominhalt:	820 Ah/kg
Nutzungsgrad:	von 95-99 %
Praktischer Strominhalt:	780 Ah/kg
Abtragungsverlust:	11,2 kg/Aa bzw. 1,6 dm <sup>3</sup> /
Anodenformen	Rechteckig (Platten oder Block), rund (Stabform)
Querschnittsfläche:	bis zu 100 cm <sup>2</sup>
Anodenlänge:	bis zu 150 cm
Anodengewicht:	bis zu 100 kg (netto).

### Aluminium-Anoden

Aluminium ist in reiner Form als Anodenmaterial grundsätzlich nicht einsetzbar, weil es bereits an der Luft eine dichte, passivierende Oxidschicht bildet und einen gleichmäßigen Stromfluss verhindert.

Um diese Deckschichtbildung zu vermeiden und die Wirksamkeit der Anoden langfristig aufrecht zu erhalten, müssen aktivierende Elemente wie z. B. Zink oder Indium hinzulegiert werden. Eine einfache Legierung mit Zink bringt bei einem Potentialen von  $-1.000$  bis  $1.060$  mV/Cu nur eine Ausbeute von 50-80%. Durch Zugabe von Gallium, Indium oder Zinn erniedrigt sich das Ruhepotential um 150 mV, die Ausbeute steigt deutlich an.

Anoden mit Zink- und Indium-Zugabe weisen eine verringerte Polarisierbarkeit auf.

Infolge der niedrigen Dichte eignen sich die Aluminiumanoden gut für eine langfristige Schutzdauer (bis zu 30 Jahre).

### Werkstoff

Aluminiumanoden werden in zwei Legierungsvarianten hergestellt, von denen die indiumhaltige Legierung bevorzugt verwendet werden sollte.

Dichte:	2,8 g/cm <sup>3</sup>
Theor. Strominhalt:	2850 Ah/kg
Nutzungsgrad:	80-95 %
Praktischer Strominhalt:	2700 Ah/kg
Abtragungsverlust:	3,25 kg/Aa bzw. 1,16 dm <sup>3</sup> /Aa
Anodenformen:	flach, rechteckig und stangenförmig
Querschnittfläche:	bis zu 560 cm <sup>2</sup>
Anodenlänge:	bis zu 280 cm
Anodengewicht:	bis zu 400 kg (netto).

### Magnesium-Anoden

Magnesiumanoden weisen die höchste Treibspannung und einen hohen theor. Strominhalt auf. Sie eignen sich dementsprechend besonders gut für den Einsatz in Gewässern mit niedriger Leitfähigkeit und wenn eine größere Schutzstromdichte benötigt wird.

Durch die Zugabe von Zink wird der Abtrag der Anoden gleichmäßiger und die Empfindlichkeit gegenüber anderen Verunreinigungen im Anodenwerkstoff herabgesetzt.

In Süßwässern neigt Magnesium nur im geringen Maße zur Ausbildung isolierender Deckschichten. Es unterliegt aber in erheblichem Umfang der Eigenkorrosion, deren Geschwindigkeit mit dem steigenden Salzgehalt der Gewässer noch zunimmt. Durch im praktischen Einsatz häufig lochfraßartigen Abtrag, lagern sich feste Verschmutzungen ab, die regelmäßig zu entfernen sind. Das gilt insbesondere bei geringem Strombedarf.

Magnesiumanoden sollten dort eingesetzt werden, wo die Treibspannung von Zink und Aluminium nicht ausreicht oder wo für diese Anodenwerkstoffe die Gefahr der Passivierung zu groß ist.

An Bauwerken mit Korrosionsschutzbeschichtungen in gut leitenden Gewässern kann die Zwischenschaltung eines Widerstandes zur Strombegrenzung erforderlich werden, um eine Beschädigung der Beschichtungen bzw. eine zu starke Absenkung der Potentiale zu vermeiden.

Wegen der intensiven Eigenkorrosion wird an den Anoden gasförmiger Wasserstoff freigesetzt.

#### Werkstoff

Die Magnesiumanoden werden in drei Legierungen hergestellt, von denen die Sorte AZ 63 für gegossene Anoden am weitesten verbreitet ist.

Dichte:	1,8-2,0 g/cm <sup>3</sup>
Theor. Strominhalt:	2185 Ah/kg
Nutzungsgrad:	ca. 50 %
Praktischer Strominhalt:	1100 Ah/kg
Abtragungsverlust:	8,0 kg/Aa bzw. 4,2 dm <sup>3</sup> /Aa
Anodenformen:	flach , rechteckige und runde Platten - , Block- und Stabanoden
Querschnittsfläche:	bis zu 240 cm <sup>2</sup>
Anodenlänge:	bis zu 150 cm
Anodengewicht:	bis zu 62,5 kg (netto).

### **10.3 Bemessung der Schutzanlagen**

Der maßgebliche Faktor für die Bemessung galvanischer Anoden ist der Schutzstrombedarf des jeweiligen Stahlbauwerkes. Da dieser in der Regel nicht bekannt ist, bietet es sich an, die für einfache Anwendungsfälle in der Tabelle 7.3 "Richtwerte für Stromdichte" (Abschnitt 7.3.3) aufgeführten Daten zu verwenden.

Wenn jedoch ältere und/oder unbeschichtete Bauwerke mit Anoden ausgerüstet werden sollen, sind, angepasst an die örtlichen Verhältnisse, geschätzte Zuschläge in nicht unerheblicher Höhe zu berücksichtigen. Da hierdurch die Bemessung der Schutzanlage nicht mehr mit der erforderlichen Sicherheit vorgenommen werden kann, empfiehlt es sich, in solchen Fällen Einspeisungsversuche vorzunehmen.

Unter den vorhandenen Bauwerks- und Umgebungsbedingungen können in den Einspeisungsversuche Aufschlüsse über den geeigneten Anodenwerkstoff, die zweckmäßige Verteilung der Anoden auf der Bauwerksoberfläche und die erforderliche Schutzstromdichte gewonnen werden.

Das Anodengesamtgewicht (m in kg) für ein Stahlwasserbauwerk wird unter Berücksichtigung der zu schützenden, wasserbedeckten Stahloberfläche (a in m<sup>2</sup>), der ermittelten Schutzstromdichte (I in A/m<sup>2</sup>), der Schutzdauer (t in h) und der Kapazität des für den Einsatz vorgesehenen Anodenwerkstoffes (Q in Ah/kg) berechnet (s. auch Gl. 7.9):

$$m = a \cdot I \cdot t / Q$$

Gl. 10.1)

m = Benötigte Anodenmasse [g]

a = Wasserbedeckte Stahloberfläche [m<sup>2</sup>]

I = Stromstärke [A]

t = Schutzdauer [h]

Q = Kapazität des Anodenwerkstoffes [Ah/kg]

Beispiel:

Für eine Schutzfläche von 500 m<sup>2</sup> mit einer Schutzstromdichte von 0,2 A/m<sup>2</sup> und einer Schutzdauer von 10 Jahren müssten dann entweder 11.200 kg bzw. 1600 dm<sup>3</sup> Zink-, 3200 kg bzw. 1140 dm<sup>3</sup> Aluminium- oder 8000 kg bzw. 4200 dm<sup>3</sup> Magnesiumanoden installiert werden.

Bei der Auswahl der Anodenform ist zu beachten, dass die Schutzwirkung eine Funktion der Oberfläche darstellt. Das bedeutet, dass für Objekte mit einer relativ kurzen Schutzdauer Anoden mit einem kleineren Verhältnis Querschnittsfläche/Umfang verwendet werden sollten (z. B. plattenförmige Anoden). Für Anoden mit einer längeren Schutzzeit ist eine erhebliche Zunahme dieses Verhältnisses anzustreben (z. B. prisma- oder zylinderförmige Anoden).

Die Einbeziehung sämtlicher Bauwerksteile mit allen Korrosionszonen in ein kathodisches Schutzsystem ist nicht immer zwingend erforderlich. Zumeist genügt es, insbesondere bei nachträglicher Montage, nur die Bauwerksteile, die bereits einen besonders starken Korrosionsverlust erlitten haben, vor weiterer Abrostung zu schützen. In die Bemessungsformel ist dann nur die Fläche des gefährdeten Bereiches und für die Schutzstromdichte ein um 30-50 % erhöhter Wert einzusetzen. Damit wird sichergestellt, dass die Schutzfläche den vollen Schutzstrombedarf erhält und die Schutzwirkung auf den angrenzenden Bauwerksflächen abklingen kann.

Nicht in allen Anwendungsfällen ist die Absenkung des Korrosionspotentials auf das Schutzpotential (-850 mV/Cu), bei dem die Korrosionsabläufe unterbunden werden, erforderlich. Oft genügt es, zur Verlängerung der Nutzungsdauer von Bauwerken eine Reduzierung der Korrosionsgeschwindigkeit durch einen Teilschutz herbeizuführen. Das Schutzpotential wird in diesem Fall nicht bis -850 mV/Cu abgesenkt. Die Berechnung der Anodenmasse erfolgt dann über eine verringerte Schutzstromdichte, und die Auswahl der Anodenform wird unter Berücksichtigung eines höheren Verhältnisses Querschnittsfläche/Umfang vorgenommen.

Da der kathodische Korrosionsschutz mit galvanischen Anoden in der Regel mit einem relativ hohen Abtragungsverlust an Anodenmaterial verbunden ist, muss, besonders für Objekte die einen hohen Schutzstrombedarf erfordern, stets überprüft werden, ob eine Verunreinigung der Gewässer mit dem jeweiligen Anodengrundstoff und seinen Legierungsbestandteilen hingenommen werden kann. Als Alternative würde sich dann die Installation eines kathodischen Korrosionsschutzes mit Fremdstrom anbieten.

## **11. Schutzverfahren mittels Fremdstrom**

### **11.1 Bautechnische Voraussetzungen**

Eine technisch und wirtschaftlich optimale Lösung von KKS-Anlagen für Wasserbauwerke lässt sich nur dann verwirklichen, wenn bereits während der Ausführungsplanung des Bauwerkes der Fachingenieur für Korrosionsschutz hinzugezogen wird. Dieser entscheidet, abgestimmt auf die Bauwerksplanung und die zu erwartenden Beanspruchungen, über die Art und Methodik des anzuwendenden kathodischen Korrosionsschutzes, plant die Anlage im Detail und sorgt dafür, dass die für den KKS erforderlichen Maßnahmen in die Ausführungsplanung des Bauwerkes einfließen.

Jedes nachträgliche Tätigwerden des KKS-Ingenieurs nach Abschluss der Bauwerksplanung oder gar nach Baubeginn oder Fertigstellung zwingt zu Kompromissen, zu Änderungsarbeiten und vermeidbaren Kosten.

Ein nicht unerheblicher Kostenanteil von kathodischen Korrosionsschutzanlagen (KKS) für Wasserbauwerke ist für Beton- und Stahlwasserbauarbeiten anzusetzen. Er kann für Bauwerke bei denen der KKS nachträglich geplant und installiert wird je nach Art des Bauwerkes ca. 30-60% der Gesamtkosten betragen.

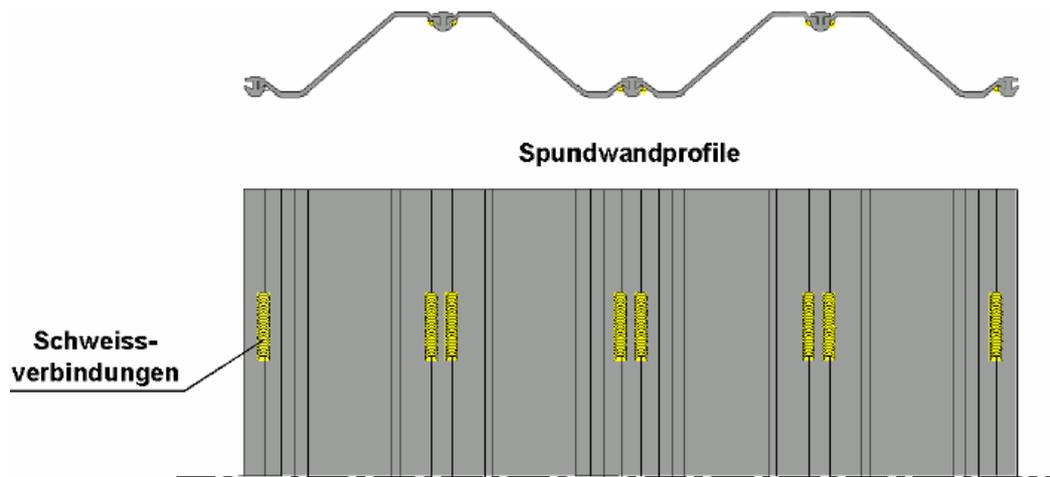
Dieser Kostenanteil lässt sich um ca. 20-50% reduzieren, wenn bei der Planung und Errichtung des Bauwerkes die bautechnischen Maßnahmen für den KKS mit berücksichtigt werden, was zu einer Gesamtkostenersparnis bis zu 30% führen kann.

Ein weiterer, manchmal erheblicher Anteil sind die Kosten für den Einsatz von Tauchern zur Montage von Anoden und Elektroden. Auch hierbei können durch Berücksichtigung von konstruktiven Maßnahmen bei Planung und Bau die Kosten für die Montage, aber auch für den späteren Betrieb auf ein Minimum reduziert werden.

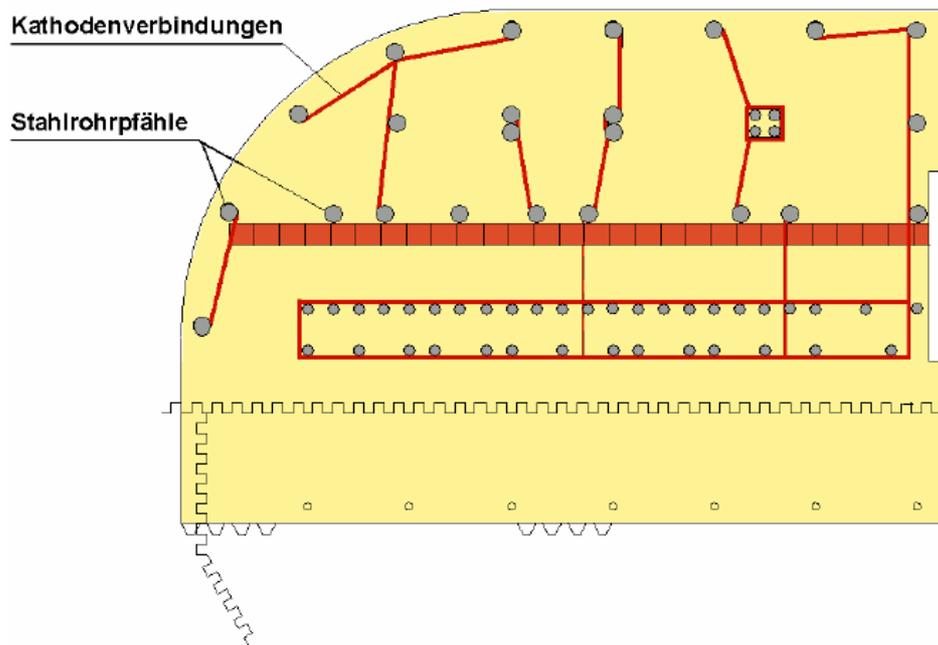
#### **11.1.1 Kathodenlängsleitfähigkeit**

Für die Wirkung des kathodischen Korrosionsschutzes ist es wichtig, dass die zu schützenden Stahl- oder Stahlbetonbauteile eine ausreichend niederohmige elektrische Leitfähigkeit untereinander haben, um eine entsprechend gleichmäßige Stromverteilung zu erreichen (s. Abb. 11.1 und 11.2).

Je nach Art des Bauwerkes kann dies durch die verschiedensten Konstruktionen durchgeführt werden. Meist reicht ein Verschweißen von Stahlteilen oder Bewehrungsstählen aus. Nur in Sonderfällen sind zusätzliche Kabelverbindungen erforderlich. Dann wird es notwendig, zusätzliche Kabelschutzrohre oder Schächte vorzusehen.



**Abb. 11.1:** Längsleitfähigkeit an Spundwandschlössern



**Abb. 11.2:** Längsleitfähigkeit verteilter Schutzobjekte

Das nachträgliche Herstellen der Kathodenlängsleitfähigkeit ist technisch immer aufwändiger und teurer und bei fertig gestellten Hafenanlagen technisch kaum mehr möglich.

### 11.1.2 Verhinderung von Elementbildung

Eine häufige Korrosionsursache an Wasser-Bauwerken ist die Elementbildung an den Übergängen Stahl - Stahl/Beton sowohl im Unterwasserbereich als auch über Wasser (Abb. 11.3).

Auch hierbei kann durch geeignete konstruktive Maßnahmen oder auch durch Isolierung und Beschichtung die Korrosionsgefahr erheblich reduziert werden

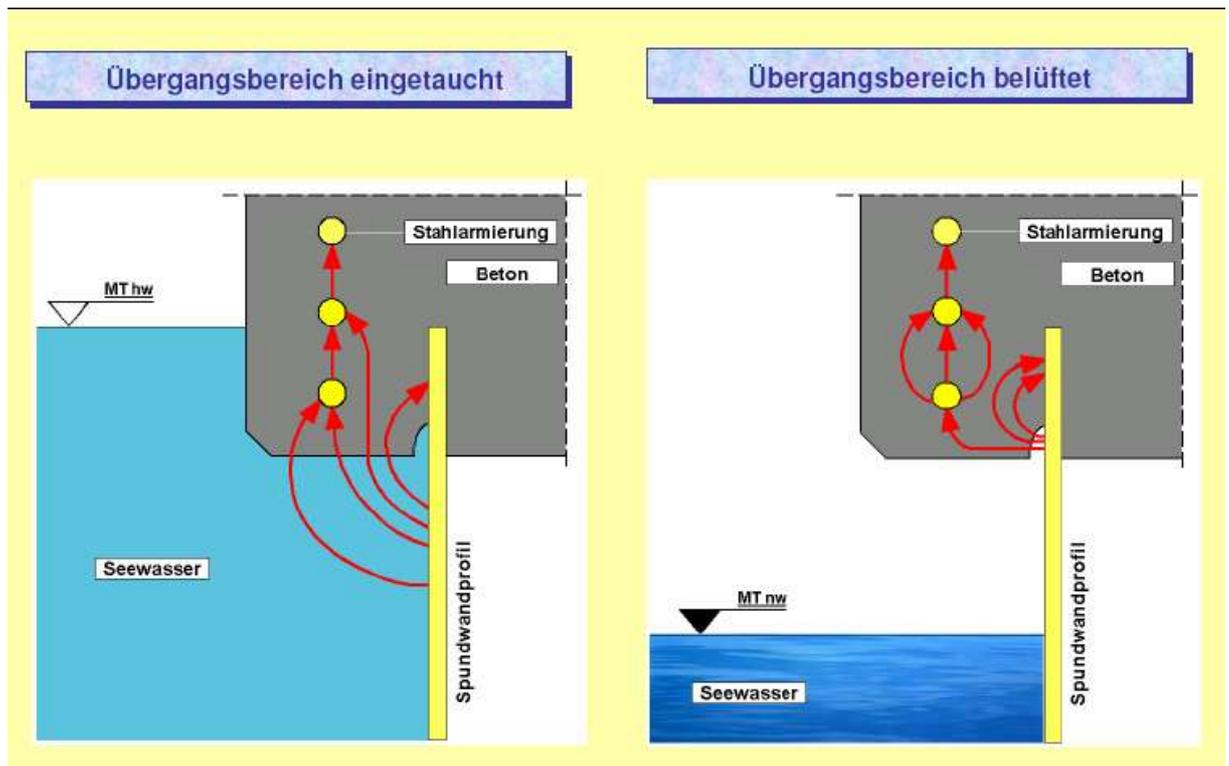


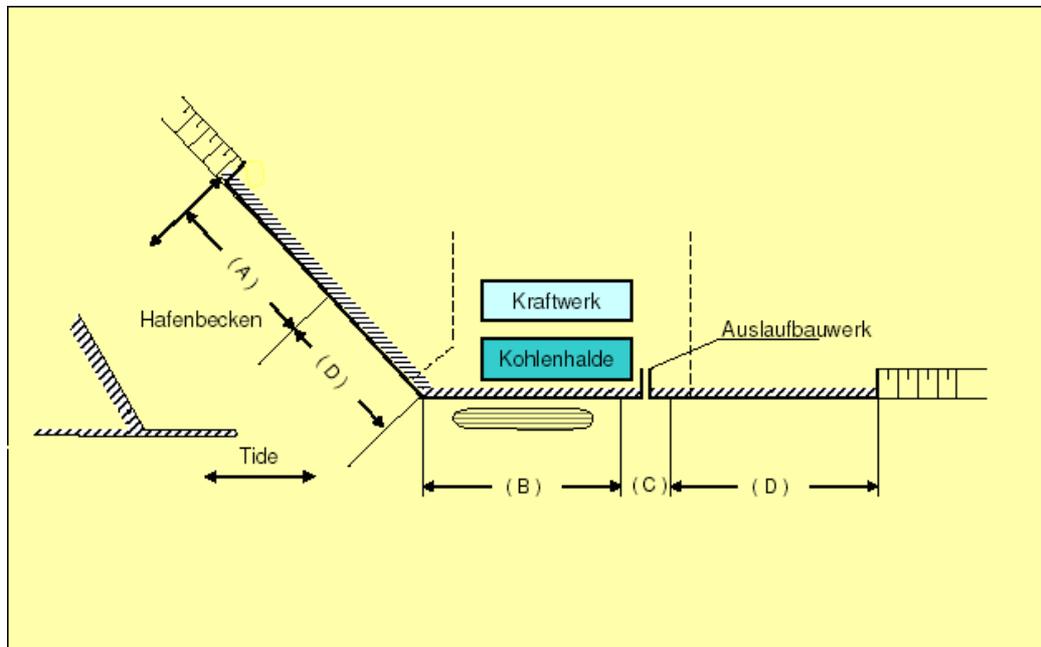
Abb. 11.3: Übergang Spundwandkopf - Betonholm

### 11.1.3 Stand- und Einbauorte von KKS - Bauteilen

Eine wesentliche Voraussetzung für die funktionsgerechte Wirkungsweise einer kathodischen Korrosionsschutzanlage liegt in der Wahl einer zweckmäßigen, den örtlichen Verhältnissen angepassten Geometrie. Dabei sollten folgende Gesichtspunkte beachtet werden:

- Das Schutzobjekt ist in Abschnitte mit annähernd gleichen Korrosionsbedingungen zu gliedern. Das gilt insbesondere für Bereiche mit verunreinigtem und/oder bewegtem Wasser (Strömung, Turbulenzen, Wellen) sowie für Bauwerksabschnitte mit stark unterschiedlicher elektrischer Leitfähigkeit des Wassers und Bodens oder mit unterschiedlichem mechanischem Angriff (Eisgang, Sandschliff, Schiffberührung). Dabei sind auch Bereiche mit passierendem bzw. ruhendem Schiffsverkehr besonders zu unterscheiden (Abb. 11.4).  
(A) Bereich mit geringer Wasserströmung, mit passierendem Verkehr und geringem mechanischem Angriff.

- (B) Bereich mit ruhendem Verkehr (Schiffsliegeplatz), mit großer Wasserströmung und Eisgang.
- (C) Bereich mit erhöhter Wassertemperatur, mit strömendem Wasser, Eisgang und passierendem Verkehr.
- (D) Bereich mit passierendem Verkehr, mit großer Wasserströmung und Eisgang.



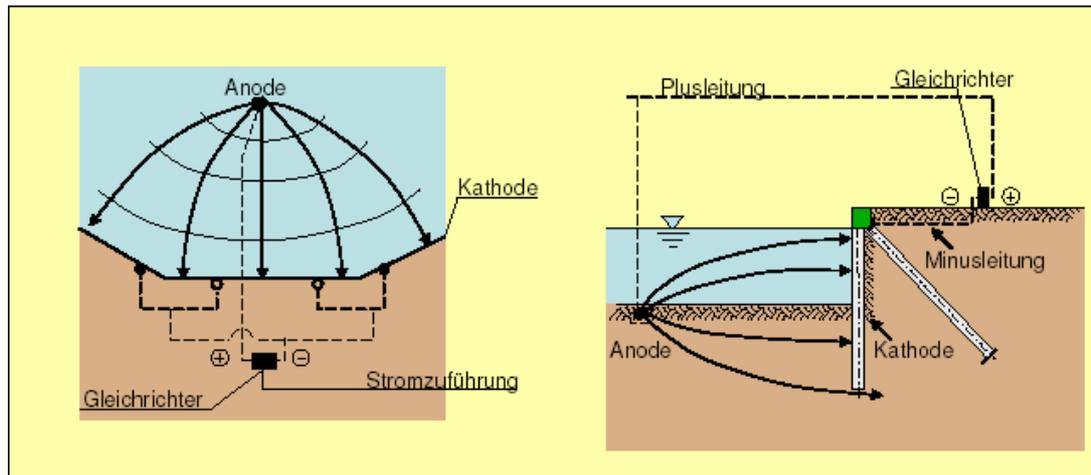
**Abb. 11.4:** Beispiel für die Gliederung des Schutzobjekts in einzelne Schutzbereiche

- Eine konkave Linienführung im Grundriss eines Schutzobjekts ermöglicht bei einheitlichen Korrosionsverhältnissen die Anwendung einer zentral wirkenden Grundform mit wenigen Anoden und Gleichrichtern.
- Konvexe Formen des Bauwerksgrundrisses verlangen in der Regel - auch bei sonst einheitlichen Korrosionsverhältnissen - die Wahl getrennt gespeister Einzelanlagen mit einer größeren Anzahl von Anoden und Gleichrichtern.
- Befinden sich im Nahbereich der zu schützenden Bauwerke Fremdoobjekte aus Stahl oder anderen Metallen (Hafenanlagen, Rohrleitungen, Kabel etc.), sind Anoden mit geringerer Stromabgabe und begrenzter Reichweite vorzusehen.

Die bei den verschiedenen Grundformen für kathodische Korrosionsschutzanlagen im Regelfall zu erwartenden Vor- und Nachteile werden in den Abschn. 11.1.3.1 bis 11.1.3.3 erläutert.

### 11.1.3.1 Zentral wirkende Schutzanlagen mit Anoden in größerem Abstand zum Bauwerk

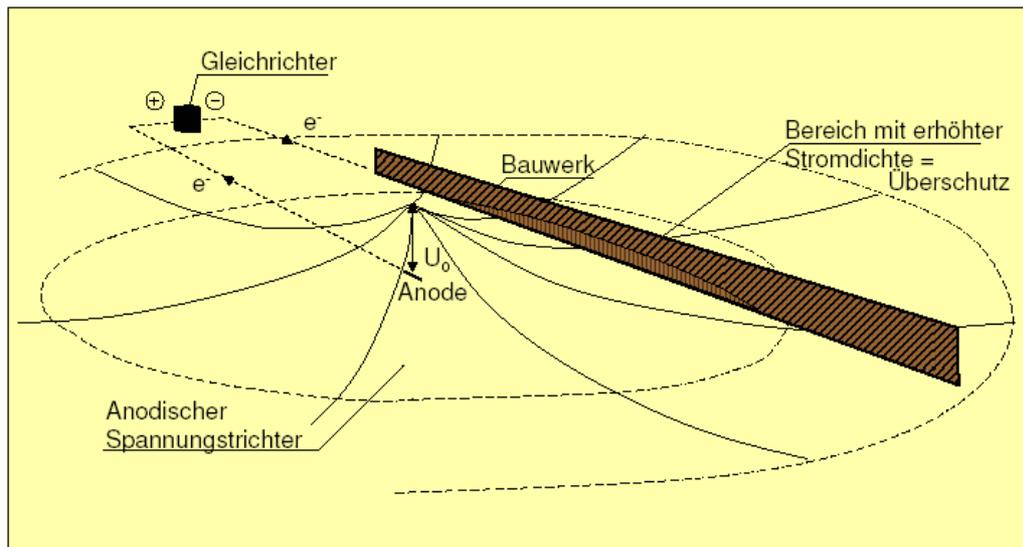
Bei zentral wirkenden Schutzanlagen wird angestrebt, einen möglichst großen Bauwerksabschnitt mit der geringsten Anzahl von Geräten und Einrichtungen in nur einem Stromkreis gegen Korrosion zu schützen (Abb. 11.5).



**Abb. 11.5:** Schematischer Lageplan und Querschnitt für eine zentral wirkende Schutzanlage

Maßgebend für die maximal vertretbare Länge des Schutzobjekts ist im Wesentlichen der Ohmsche Spannungsfall im Bauwerk sowie in den Plus- und Minusleitungen. Da an den Bauwerksenden (Abb. 11.6) einerseits das notwendige Schutzpotential von etwa  $-850$  [mV/Cu] zu gewährleisten ist, in der Mitte des Bauwerks aber mit Rücksicht auf die Vermeidung eines Überschlusses (Wasserstoffbildung) das Schutzpotential an der Phasengrenze auf etwa  $-1150$  [mV/Cu] begrenzt werden muss, darf der spezifische Schutzstrom  $i$  [mA/m<sup>2</sup>] bestimmte Werte nicht unter- aber auch nicht überschreiten. Aus diesem Grunde sollten die Schutzabschnitte so gewählt werden, dass der Ohmsche Spannungsfall in ihnen kleiner als  $U = 0,3$  [V] ist. Um dieses zu erreichen, empfiehlt sich eine verzweigte Kabelführung in der Minusleitung.

Nachteilige Effekte können sich bei zentral wirkenden Schutzanlagen dann einstellen, wenn der normale, ungestörte anodische Spannungstrichter über das Bauwerk hinausgreift (Abb. 11.6). Da das kathodisch geschützte Bauwerk bei Vernachlässigung der Widerstände in den Minusleitungen annähernd eine Äquipotentiallinie darstellt, wird der anodische Spannungstrichter zur Bauwerksmitte hin verzerrt, wodurch sich dort eine zu große Schutzstromdichte einstellen kann. Es ist bei dieser Grundform vorteilhaft, die Anode so weit entfernt vom Bauwerk anzubringen, dass der anodische Spannungstrichter bereits ausreichend abgebaut ist, wenn er das Bauwerk erreicht.



**Abb. 11.6:** Anodischer Spannungstrichter nahe zum Schutzobjekt

Bei zentral wirkenden Schutzanlagen werden Anoden mit sehr großer Stromabgabe benötigt. Hierzu wurde früher oft als Anode ein so genanntes Grundbett verwendet, das aus zusammengeschweißten, in einem Koksbett verlegtem Stahlschrott hergestellt wurde. Es besaß aufgrund seiner großen Oberfläche einen relativ kleinen Übergangswiderstand, so dass die Anlage im Allgemeinen mit niedriger Spannung und mit einem geringen Netzstromverbrauch betrieben werden konnte.

Die heute übliche Alternative zum Grundbett bildet die sternförmige Anordnung von mehreren marktgängigen, kleineren Anoden, die zu einer Zentralanode (Anodengruppe) zusammengefasst werden. In diesem Fall kommt beispielsweise auch die Anwendung von platinieren Titananoden in Betracht, die dann jedoch aus Gründen einer ausreichenden Belüftung im freien Wasser über dem Hafengrund verlegt werden müssen (s. Abschnitt 11.2.2.2). Ob Letzteres möglich ist, hängt von der örtlichen Situation, insbesondere von der Lage der Zentralanode zum Fahrwasser, zu den Schiffs Liegeplätzen und ggf. von dem zu erwartenden Schlickanfall bzw. der Versandung ab.

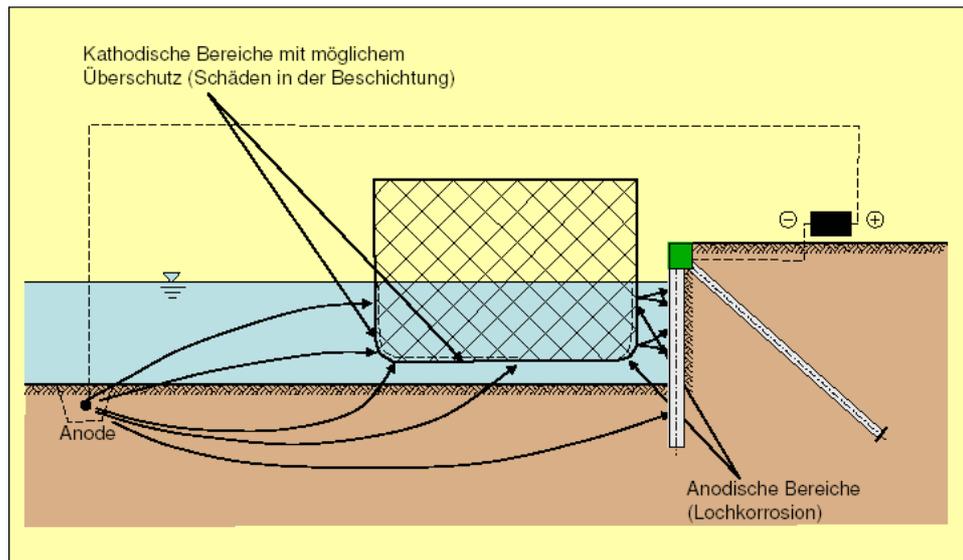
Den wirtschaftlichen Vorteilen der zentral wirkenden Schutzanlagen, die sich aus den verhältnismäßig niedrigen Investitionskosten und den geringeren Betriebskosten ergeben, stehen einige Nachteile gegenüber, welche die Möglichkeiten für eine Anwendung dieser Grundform weitgehend einschränken:

- Die als Zentralanode wirkende Anodengruppe kann ihre Schutzfunktion wegen des großen Abstandes zum Bauwerk nur dann ausüben, wenn das Wasser eine hohe elektrische Leitfähigkeit besitzt.
- Eine Anpassung der Schutzstromdichte an örtlich stark unterschiedliche Korrosionsverhältnisse ist ohne teilweise Aufgabe der wirtschaftlichen Vorteile kaum möglich.
- Bei Betriebsstörungen an der Anode oder am Gleichrichter fällt die Gesamtanlage aus. Dabei muss erwähnt werden, dass gerade Schrottanoden wenig zuverlässig arbeiten (s. Abschnitt 11.2.2.1).
- Eine Schrottanode im Grundbett und deren Kabelzuführung liegen dicht unter der Hafener oder Fahrwassersohle. Sie sind deshalb bei Baggerarbeiten und beim Werfen bzw.

Durchpflügen von Schiffsankern gefährdet.

Wird die Zentralanode in der Form einer Anodengruppe durch mehrere kleinere Anoden aus Graphit, Magnetit, Ferrosilizium oder Platin/Titan gebildet, ist bei der Wahl des Standorts ebenfalls auf den Schiffsverkehr und den sonstigen Hafenbetrieb Rücksicht zu nehmen. Wegen der erforderlichen Belüftung der Anoden können sich auch Schlickfall und Sandwanderung unter Umständen nachteilig auswirken.

- Alle innerhalb des ausgedehnten anodischen Spannungstrichters liegenden fremden Stahlbauwerke, metallischen Rohrleitungen, Kabel und dergleichen, die keine ausreichend leitende Verbindung zur Kathode, d. h. zum eigentlichen Schutzobjekt haben, können nachteilig beeinflusst werden. Da der Stahl einen geringeren elektrischen Widerstand besitzt als Wasser und Böden, bevorzugt der Strom die fremden Objekte streckenweise als elektrischen Leiter. An den Austrittsstellen des Stroms werden wegen der Elektronenabwanderung in Richtung zur Anode erhebliche Schäden entstehen (s. Abb. 11.7). Dieser Fall kann selbst dann eintreten, wenn die fremden Objekte über eigene, getrennte Schutzanlagen verfügen.
- Vor dem Bauwerk liegende Schiffe werden ebenfalls vom Schutzstrom als ein im Vergleich zum Wasser besserer elektrischer Leiter benutzt. Auch wenn sie mit dem Bauwerk über einen Kabelanschluss leitend verbunden sind, können an beiden Seiten des Schiffskörpers Schäden an der Beschichtung und an der Stahlhaut auftreten (Abb. 11.7). Im anodischen Spannungstrichter einer Zentralanode sind Schiffe immer stark gefährdet, besonders wenn sie für längere Zeit liegen.

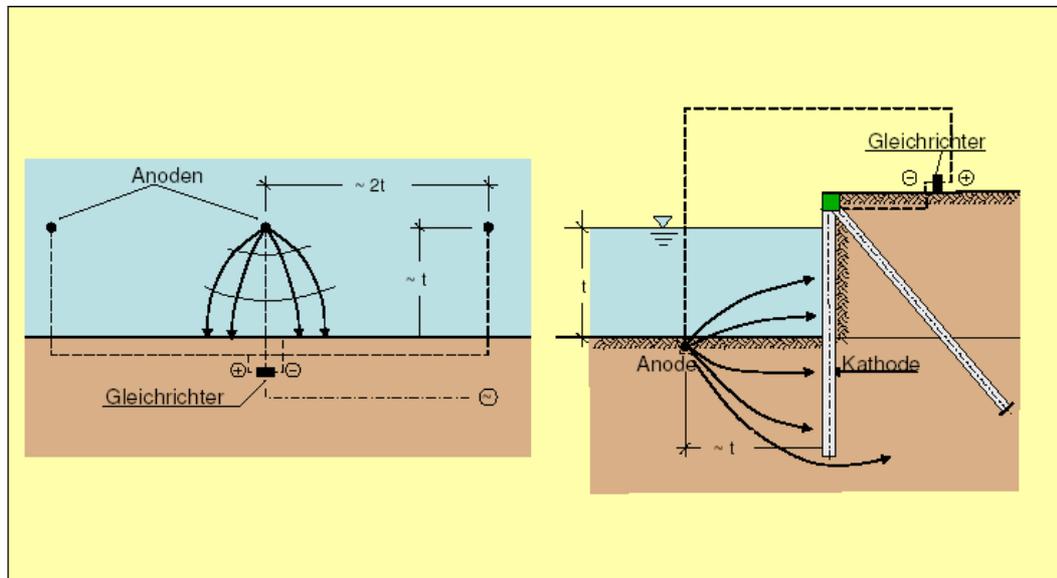


**Abb. 11.7:** Schädliche Beeinflussung eines Schiffskörpers ohne Potentialausgleich

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass sich zentral wirkende Schutzanlagen nur bei weiter abgelegenen, großräumigen Wasserbauwerken mit einheitlichen Korrosionsverhältnissen eignen, bei denen kein oder doch nur passierender Schiffsverkehr zu erwarten ist.

### 11.1.3.2 Schutzanlagen mit Anoden in geringerem Abstand zum Bauwerk

Bei diesen Schutzanlagen werden mehrere Einzelanoden in geringerem Abstand zum Bauwerk in die Hafensohle eingebettet. Konstruktiv entspricht dieser Abstand etwa der Wassertiefe vor dem Schutzobjekt (Abb. 11.8).



**Abb. 11.8:** Schematischer Lageplan und Querschnitt

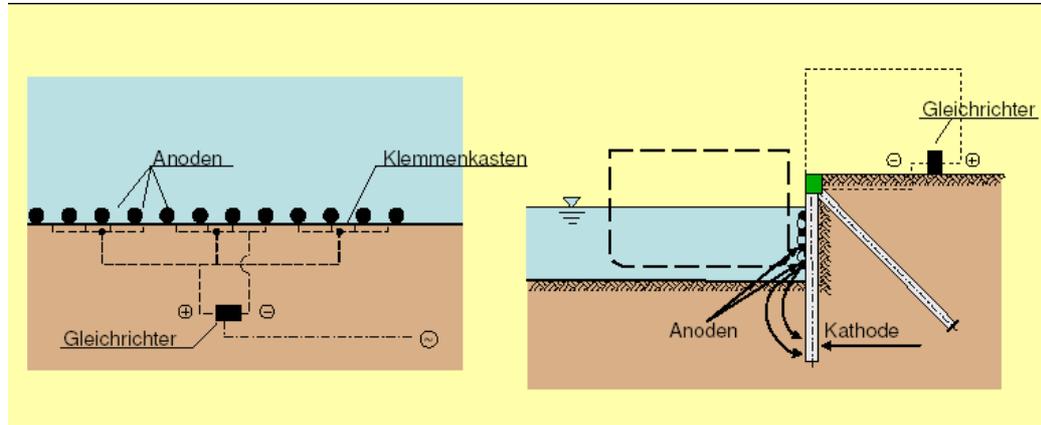
Solche Schutzanlagen verfügen gegenüber der unter Abschnitt 11.1.3.1 behandelten Grundform über folgende Vorteile:

- Der Schutzstrom kann bei örtlich unterschiedlichen Korrosionsbedingungen dem Bedarf der einzelnen Bauwerksabschnitte besser angepasst werden.
- Da der Schutzbereich der einzelnen Anoden kleiner ist, sind nur geringere Stromabgaben und niedrigere Anodenspannungen erforderlich. Demzufolge bleibt die Ausdehnung der Spannungstrichter in Grenzen (also ohne schädlichen Einfluss), wobei eine relativ gleichmäßige Potentialverteilung am Bauwerk gewährleistet werden kann.
- Es können Anoden mit hoher Oberflächenbelastung verwendet werden (s. Abschnitt 11.2.2). Der Betrieb der Anlage wird dadurch zuverlässiger und sicherer, zumal der vorübergehende Ausfall von einzelnen Anoden die Funktionsfähigkeit der Gesamtanlage nicht wesentlich einschränken kann.
- Leistungsverluste durch die Ausbreitungswiderstände an den Anoden und durch den Ohmschen Widerstand in den Anodenleitungen können in vertretbaren Grenzen gehalten werden.

Die hier angesprochene Grundform führt in der Regel ebenfalls zu wirtschaftlichen Lösungen für kathodische Korrosionsschutzanlagen. Sie sollte jedoch nur dann gewählt werden, wenn an den zu schützenden Bauwerken Schiffe nicht festmachen, weil die unter Abschnitt 11.1.3.1 erläuterten Nachteile auch für Anlagen dieser Art gelten.

### 11.1.3.3 Schutzanlagen mit Anoden unmittelbar vor dem Bauwerk

Bei dieser Grundform werden die Anoden entweder am oder unmittelbar vor dem Bauwerk angeordnet. Bei Spundwänden lassen sich hierfür beispielsweise die Täler nutzen, wobei für die Anoden eventuell auch eine gestaffelte Höhenlage zweckmäßig sein kann (Abb. 11.9).



**Abb. 11.9:** Schematischer Lageplan und Querschnitt

Anlagen dieser Art besitzen folgende Vorteile:

- Der Schutzstrom kann gleichmäßiger über das Bauwerk verteilt und gegebenenfalls auch den örtlich unterschiedlichen Korrosionsbedingungen angepasst werden. Das gilt z. B. für Zonen mit unterschiedlichem Belüftungs- oder Verschmutzungsgrad des Wassers, für Bereiche mit starkem mechanischem Angriff sowie für den zusätzlichen Schutzstrombedarf von Sonderbauteilen, die zum Gesamtkomplex gehören (vorgesetzte Stahldalben, Fenderschürzen und dergleichen).
  - Es können handelsübliche Stabanoden mit kleinem Durchmesser und beliebiger Länge eingesetzt werden, die leicht im Schutz des Bauwerks zu befestigen sind. Voraussetzung dabei ist allerdings, dass für die Anoden Materialien gewählt werden, die trotz hoher Oberflächenbelastung (d.h. bei sehr großer Stromdichte in  $[A/m^2]$ ) eine ausreichend lange Lebensdauer erwarten lassen.
  - Die räumliche Ausdehnung der Spannungstrichter bleibt bei dem oben erwähnten Anodentyp gering, so dass in der Regel nachteilige Beeinflussungen von Schiffen, Versorgungsleitungen und anderen Fremdobjekten nicht auftreten. Liegen die Anoden sehr nahe vor den zu schützenden Stahloberflächen, können die nachteiligen Folgen eines Überschlusses auf die Beschichtung des Bauwerks durch die Anordnung von abschirmenden Schutzschilden gemindert werden. Dadurch wird gleichzeitig die Reichweite der Anoden erhöht und die Stromverteilung verbessert.
  - Die Anoden sind aufgrund ihrer geschützten Lage zumindest nicht durch Baggerarbeiten, durchpflügende Anker, Sandwanderungen, Schlickfall usw. gefährdet.
  - Die Anoden lassen sich in der Regel so installieren, dass sie gut kontrolliert, unterhalten und gegebenenfalls auch leicht ausgetauscht werden können.
- Die hier behandelte Grundform ist besonders bei Hafengebäuden geeignet, die als Schiffsliegeplätze dienen. Sie kann für diese als Regelausführung betrachtet werden, die

sich bereits in vielen Häfen bewährt hat. Als Nachteile sind jedoch zu erwähnen:

- Die Investitionskosten sind wegen der größeren Anzahl von Anoden gegenüber den beiden vorgenannten Varianten relativ hoch.
- Die Anoden bzw. ihre Zuleitungskabel können unter Umständen durch mechanische Einwirkungen (z. B. durch Kleinfahrzeuge, Bootshaken, Treibgut, Eis und dergleichen) beschädigt werden, wenn sie nicht durch Schutzrohre, Reibhölzer und dgl. gesichert sind.
- Bei extrem tiefen Tälern nicht konservierter Spundwände kann durch Abschirmungseffekte die gleichmäßige Stromverteilung gestört sein. In solchen Fällen muss von vornherein zusätzlich eine Beschichtung zwingend vorgenommen oder die Anodenanzahl erhöht werden.

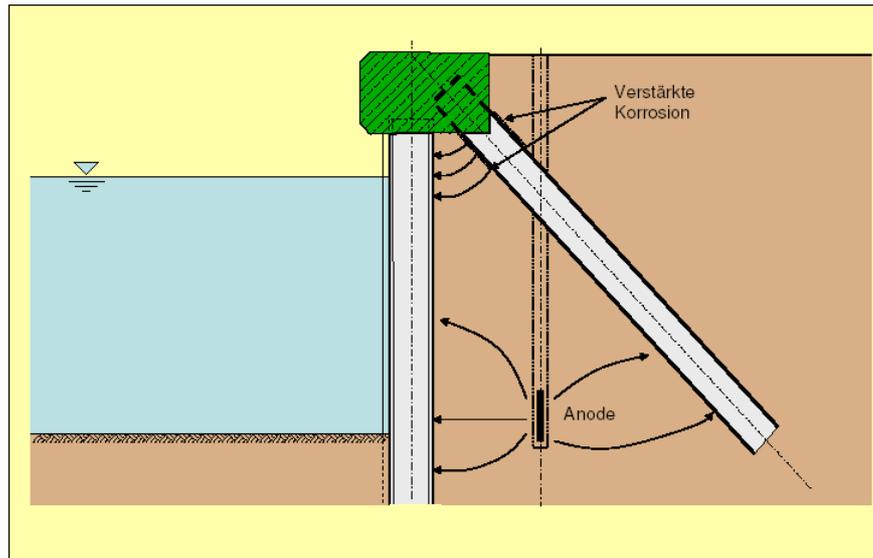
#### **11.1.3.4 Schutzanlagen mit zusätzlichen Anoden hinter dem Bauwerk**

Die unter Abschnitt 11.1.3.1 bis 11.1.3.3 behandelten Grundformen von Schutzanlagen gehen davon aus, dass die Gefahr der Stahlkorrosion im Allgemeinen nur auf der dem Wasser zugewandten Seite des Bauwerks gegeben ist. Ein wirkungsvoller Korrosionsschutz auf der Rückseite des Bauwerks kann daher bei diesen Anlagen in der Regel nicht erwartet werden. Das gilt vor allem dann, wenn - wie bei der Grundform nach Abschnitt 11.1.3.3 - die Anoden sehr nahe zum Schutzobjekt angeordnet sind.

Sind die örtlichen Verhältnisse jedoch derart, dass auch auf der Rückseite der stählernen Bauwerke mit stärkeren Korrosionserscheinungen zu rechnen ist (z. B. bei Umschlagplätzen für aggressive Schüttgüter) sollten im Erdreich hinter dem Schutzobjekt zusätzliche Anoden angebracht werden. Dies könnte beispielsweise in Bohrlöchern geschehen. Eine unter Umständen an der Anode auftretende Gasentwicklung muss durch geeignete Materialwahl, Bettung oder Entgasung berücksichtigt werden.

Bei einer derartigen Anodenanordnung ist es unbedingt notwendig, die rückwärtigen Stütz- und Ankerpfähle des Bauwerks, gleichgültig ob sie aus Stahl, Stahlbeton oder Spannbeton gefertigt wurden, durch Herstellung einer leitenden Verbindung zur Spundwand in das kathodische Korrosionsschutzsystem mit einzubeziehen (Abb. 11.10).

Wird diese Forderung vernachlässigt, könnte ein Teil des Schutzstroms in die nahe zur Anode liegenden Pfahlabschnitte einfließen und an den in Spundwandnähe befindlichen Pfahlenden wieder austreten. Dieser unerwünschte Vorgang würde dann in bestimmten Pfahlbereichen zwar eine gewisse Schutzwirkung hervorrufen, in anderen jedoch zu einer verstärkten Korrosion führen.



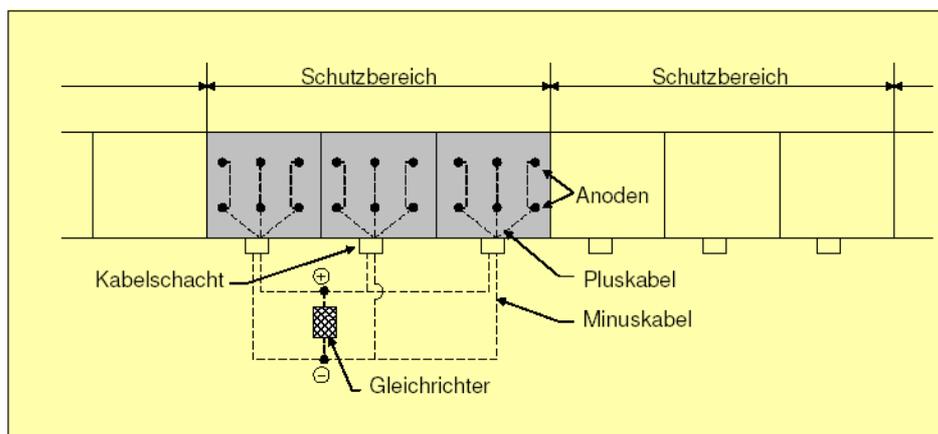
**Abb. 11.10:** Zusätzliche Anoden hinter dem Bauwerk (Sonderfall) - Verstärkung der Korrosionserscheinungen durch Streuströme an Pfählen, sofern sie nicht in das Schutzsystem einbezogen wurden

### 11.1.3.5 Grundformen von Schutzanlagen für stählerne Pfahlbauwerke

Für Pfahlbauwerke aus Stahl, wie Pieranlagen und Dalben, eignen sich die Grundformen nach Abschnitt 11.1.3.2 und 11.1.3.3.

Schutzanlagen mit Zentralanoden, deren Vor- und Nachteile bereits im Abschnitt 11.1.3.1 angesprochen wurden, sollten wegen der mangelhaften Anpassungsfähigkeit an die bauliche Gestaltung, an die gegebenenfalls unterschiedlichen Korrosionsverhältnisse und an den örtlichen Strombedarf nicht eingebaut werden.

Bei größeren Pfahlbauten ist eine gegliederte Schutzanlage vorzuziehen, die aus mehreren getrennten Schutzbereichen besteht. Zu diesem Zweck wird das Bauwerk in Abschnitte unterteilt, deren Anoden in Stromkreisen mit einem Gleichrichter zusammengefasst sind (Abb. 11.11).



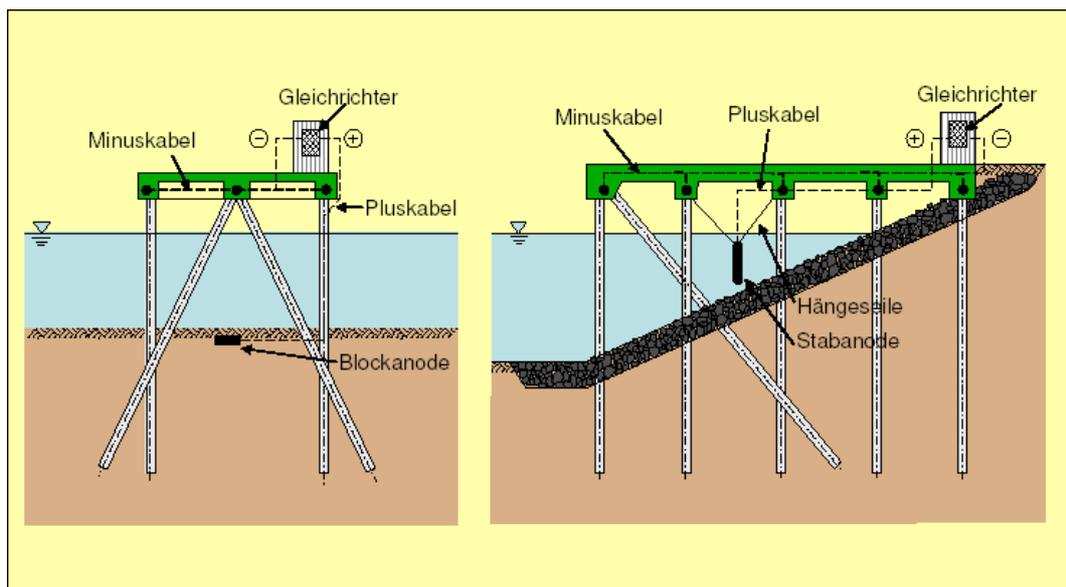
**Abb. 11.11:** In getrennte Schutzbereiche gegliedertes Pierbauwerk (mit Stabanoden unterhalb der Pierplatte)

Bei Anwendung dieser Grundformen lassen sich die Anoden im unmittelbaren Bereich des Bauwerkes anordnen, wobei deren Anzahl und Lage durch den Schutzstrombedarf der benachbarten Bauwerksteile bestimmt wird. Die Einzelanoden werden in solchen Fällen entweder als Blockanoden auf dem Hafengrund unterhalb des pierartigen Bauwerks ausgelegt (Abb. 11.12, links) oder als Stabanoden unter der Pierplatte aufgehängt (Abb. 11.12, rechts). Stabanoden können gegebenenfalls auch an oder in längeren Stützelementen befestigt werden, die in geeigneter Wassertiefe an einzelne Gründungspfähle montiert oder geschweißt wurden. Bei hängenden Anoden ist es ratsam, einen zusätzlichen Schutz der Anoden und Anschlusskabel gegen die Einwirkungen von Wellen, Eis, Treibgut und dergleichen vorzusehen (s. Abb. 11.12).

Die Anordnung der Anoden und Kabel unterhalb der Pierplatte bietet den Vorteil, dass diese empfindlichen Ausrüstungsteile nicht durch den Schiffsverkehr und bei Beachtung bestimmter Konstruktionsgrundsätze in der Regel auch nicht durch den Baggerbetrieb gefährdet sind.

Die Einzelanoden können entsprechend dem speziellen Strombedarf der Bauwerksabschnitte gleichmäßig verteilt oder aber auch örtlich konzentriert angeordnet werden. Der kathodische Korrosionsschutz lässt sich somit den unterschiedlichen Verhältnissen gut anpassen.

Ein weiterer Vorteil besteht darin, dass die Anoden in Bezug auf Material und Abmessungen, d. h. in ihrer Leistung so ausgewählt werden können, dass benachbarte Bauwerke, Einrichtungen und an der Hafenanlage vertäute Schiffe nicht nachteilig beeinflusst werden.



**Abb. 11.12:** Anodenanordnungen bei pierähnlichen Pfahlbauwerken

### **11.1.3.6 Grundformen von Schutzanlagen für kleinere Einzelbauwerke, schwimmende Hafeneinrichtungen und demontierbare Bauwerksteile**

Freistehende Sonderbauwerke und schwimmende Einzelanlagen, wie z. B. Anlege- und Vertäudalben, Pontons mit Führungsdalben und dgl., lassen sich bei einer zentral wirkenden Grundform leicht in die Gesamtanlage einbeziehen, sofern sie noch im Einflussbereich der Zentralanode liegen.

Bei einer gegliederten kathodischen Schutzanlage mit einzelnen Schutzbereichen und geringeren Anodenleistungen ist dies ebenfalls möglich. Diese Sonderbauwerke sind dann in der Regel jedoch zusätzlich mit eigenen Fremdstromanoden auszurüsten. Solche könnten, ähnlich wie in den Bildern der Abb. 11.12 dargestellt, als Block- oder Stabanoden unterhalb des Sonderbauwerks bzw. der schwimmenden Anlage platziert oder als Plattenanode unmittelbar am Schwimmkörper montiert werden.

Die Stromversorgungskabel werden dann zweckmäßig über Wasser auf Zugangstegen, Zufahrtsbrücken und dergleichen oder über nur kurze Entfernungen auch freihängend oder unter Wasser herangeführt. Sind die dafür notwendigen Voraussetzungen nicht gegeben und ist der Abstand zu den festen Hauptbauwerken der Hafenanlage zu groß, wird man von einer Verwendung von Fremdstromanoden absehen müssen, weil im Zusammenhang mit der Kabelzuführung hohe Kosten und technische Schwierigkeiten zu erwarten sind. Dies wäre beispielsweise der Fall, wenn die Elektrokabel mit Rücksicht auf den Schiffsverkehr und/oder den Baggerbetrieb in die Hafensohle eingespült werden müssten. Unter solchen Umständen sollten für den Korrosionsschutz der Sonderbauwerke und schwimmenden Einrichtungen besser Opferanoden verwendet werden, bei denen sich das Problem der Stromzufuhr gar nicht stellt (s. Abschnitt 9.3.1).

Soweit es sich bei den Schutzobjekten um demontierbare Bauwerks- und Anlagenteile handelt, wird die Frage nach der Notwendigkeit für einen kathodischen Korrosionsschutz im Wesentlichen von der baulichen oder betrieblichen Bedeutung, dem Wert und der vorgesehenen Lebensdauer solcher Teile bestimmt. Liegen Gründe vor, die solche Maßnahmen ratsam erscheinen lassen, z. B. bei Schleusentoren, schwimmenden Auflagern von beweglichen Brücken und dgl., lassen sich mit Hilfe der für Sonderbauwerke und schwimmende Anlagen empfohlenen Schutzeinrichtungen Lösungen finden, die auch langfristig einen ausreichenden und wirtschaftlich vertretbaren kathodischen Korrosionsschutz gewährleisten.

#### Montage von Halterungen für Anoden und Elektroden

Da Anoden und Elektroden je nach Werkstoff und Bauart eine begrenzte Lebensdauer aufweisen, sollten die Halterungen so konstruiert und angebracht werden, dass sowohl die Montage der Anoden und Elektroden als auch das Auswechseln möglichst ohne großen technischen Aufwand und auch ohne Arbeitsboote und Taucherarbeiten durchgeführt werden kann.

Es sind Kabelschächte und/oder Kabelschutzrohre für Anoden-, Kathoden-, Netzversorgungs- und Mess-/teuerkabel vorzusehen.

### **11.1.3.7 Festlegung der Standorte für Schutzstromgeräte, Verteilerkästen und Überwachungseinheiten**

Aufgrund der klimatischen Bedingungen an Seewasser-Bauwerken ist es zweckmäßig, die Schutzstromgeräte, Verteilerkästen und Überwachungseinheiten innerhalb von Gebäuden zu installieren. Der entsprechende Raum- und Platzbedarf sowie auch die notwendigen Kabelwege sind bei der Bauplanung zu berücksichtigen.

### **11.1.4 Kabelwege**

Verlauf und Dimensionierung der Kabelschächte und Kabelschutzrohre sollte unter Berücksichtigung der Kabelwege für die sonstigen Elektroinstallationen festgelegt werden. Häufig können gemeinsame Kabelwege genutzt werden. Schächte und Rohre sollten so geplant werden, dass nach Fertigstellung des Bauwerkes keine zusätzlichen Betonstemmarbeiten bei der Installation des kathodischen Korrosionsschutzes erforderlich werden.

Um alle diese vorgenannten bautechnischen Maßnahmen bei Planung und Bau der Gesamtanlage berücksichtigen zu können, wird es erforderlich, auch das kathodische Korrosionsschutzsystem im Detail zu planen. Diese Notwendigkeit wird an dem nachfolgenden Beispiel zur Bestimmung von Anodeneinbauorten verdeutlicht.

Die entscheidenden Kriterien hierbei sind der Schutzbereich und die zu erwartende Lebensdauer jeder einzelnen Anode unter Berücksichtigung der spezifischen Konstruktionen der Bauwerke. Unterschiedliche Beschichtungen (Übergang Boden/Wasser) oder auch mögliche Stromschattenbereiche sowie eine homogene Potentialverteilung über den gesamten Schutzbereich spielen dabei eine Rolle.

Zur Berechnung der Schutzbereiche sind die Parameter Schutzstromdichte und spezifischer Widerstand des Mediums, aber auch tideabhängige Unterschiede in Wasserstand und Leitwert erforderlich.

Der Anodentyp und die Bauform werden letztlich von der zu erzielenden Lebensdauer und der Anodenstromdichte bestimmt.

Die geometrische Anordnung bzw. Konstruktion der Anodenhaltung ist mitentscheidend für die Homogenität der Potentialverteilung.

Dieses Beispiel zeigt, dass eine Detailplanung des kathodischen Korrosionsschutzes sowie die enge Zusammenarbeit im Vorfeld der allgemeinen Bauplanung zwischen dem planenden Ingenieur der Gesamtanlage und dem Korrosionsschutzingenieur erforderlich ist, um eine optimale technische und wirtschaftliche Lösung zu erzielen.

Erfahrungen zeigen, dass weitgehend auf Tauchereinsätze für Unterwasserarbeiten, Montagen mit Arbeitsbooten und auch auf tiden- und strömungsabhängige Arbeiten verzichtet werden kann.

Neben den wirtschaftlichen Aspekten bei diesem Konzept sind auch noch die Vorteile der verkürzten Bauzeiten und der einfacheren Kostenermittlung der anbietenden Korrosionsschutzfirmen zu beachten.

## 11.2 Auswahl der Bauteile

Ein fremdstromgespeistes, kathodisches Korrosionsschutzsystem für Meerwasserbauwerke besteht im Wesentlichen aus folgenden Anlagenteilen:

- Schutzstromgeräte
- Anoden- und Anodenhalterungen
- Bezugselektroden und Halterungen
- Kabel, Kabelverbindungen und Schutzrohre
- Klemm- und Verbindungskästen
- Überwachungs- und Steuerungssysteme

### 11.2.1 Schutzstromgeräte

Als Schutzstrom-Speisegeräte kommen vorwiegend handelsübliche netzbetriebene Schutzstromgeräte zur Anwendung. In Sonderfällen können auch alternative Stromversorgungen, wie Solar-, Thermo- oder Windgeneratoren eingesetzt werden.

Bekanntlich ist jede Korrosionsschutzanlage ein maßgeschneidertes, auf das jeweilige Bauwerk angepasstes Schutzsystem. Das gilt auch für die Auswahl der Schutzstromgeräte.

Wie in nachfolgender Auflistung dargestellt, kann das Schutzstromgerät durch eine Vielzahl von Variationsmöglichkeiten den Erfordernissen der maßgeschneiderten Anlage angepasst werden.

- Aufstellort (innerhalb, außerhalb, Überflutungsbereich, im Ex-Bereich)
- Ausführung (luftgekühlt, ölgekühlt, Explosionssgeschützt, überflutungssicher)
- Netzversorgung (einphasig, dreiphasig)
- Ausgangsregelung  
spannungskonstant (in Stufen, Stelltrafo – Hand, Stelltrafo – Motor, Mikroprozessor)  
potentialregelnd (Zwei-Punkt-Regelung, Mikroprozessor, Transduktor, Thyristor)  
stromkonstant (Mikroprozessor, elektronisch, rechnergestützte Steuerung)
- Fernüberwachung (Fehleralarm, Potential, Schutzstrom, Ausgangsspannung)
- Optionen (Synchronschaltuhr, Messwertumformer, Strombegrenzung, Grundstromeinstellung).

Für Wasserbauwerke können einfache spannungskonstante Schutzstromgeräte eingesetzt werden.

Elektronisch gesteuerte Geräte haben jedoch den Vorteil der einfachen Steuerung und Überwachung sowie die Möglichkeit der durchgängigen Dokumentation. Mit diesen Geräten ist auch ein stromkonstanter und potentialregelnder Betrieb möglich. Diese Regelungsarten sind bei beschichteten Schutzobjekten auf Grund der Potentialbegrenzung zur Minimierung von Blasenbildung sinnvoll und notwendig.

Bei Schutzstromgeräten handelt es sich um besondere Ausführungen von Gleichrichteranlagen für den kathodischen Schutz zum Anschluss an das Wechselstrom- oder Drehstromnetz. Schutzstromgeräte müssen in höchstem Maße robust und zuverlässig im Dauerbetrieb sein. Sie sollten nur von Herstellern bezogen werden, die auf den Bau von Schutzstromgeräten spezialisiert sind.

#### 11.2.1.1 Bauformen

Schutzstromgeräte geringer Nennleistung können als Einphasengeräte für den Anschluss an das Wechselstromnetz ausgeführt werden. Bei Nennleistungen, die den Bereich von 1 kW überschreiten, sollten Geräte in Dreiphasenausführung zur Anwendung kommen (beim Anschluss von platinieren Anoden sind Geräte mit einer geringen Restwelligkeit von  $\leq 5\%$  obligatorisch!).

Bei geregelten Schutzstromgeräten werden auch elektronisch gesteuerte Geräten eingesetzt (z.B. thyristorgesteuert oder PWM-Wandler (PWM = pulsweitenmoduliert)). Diese Geräte bieten den Vorteil einer stufenlosen Steuerung. PWM-Geräte besitzen dazu noch einen relativ hohen Wirkungsgrad von  $>80\%$ .

Bei automatisch regelnden Gerätetypen passt sich die Automatik den Einflüssen an, die sekundärseitig auf das Gerät einwirken (z. B. wechselnder Elektrolytwiderstand zwischen Anoden und Kathode, Streustromeinflüsse, wechselnder Strombedarf). Automatische Geräte sind jedoch kein Ersatz für routinemäßigen Kontrollaufwand.

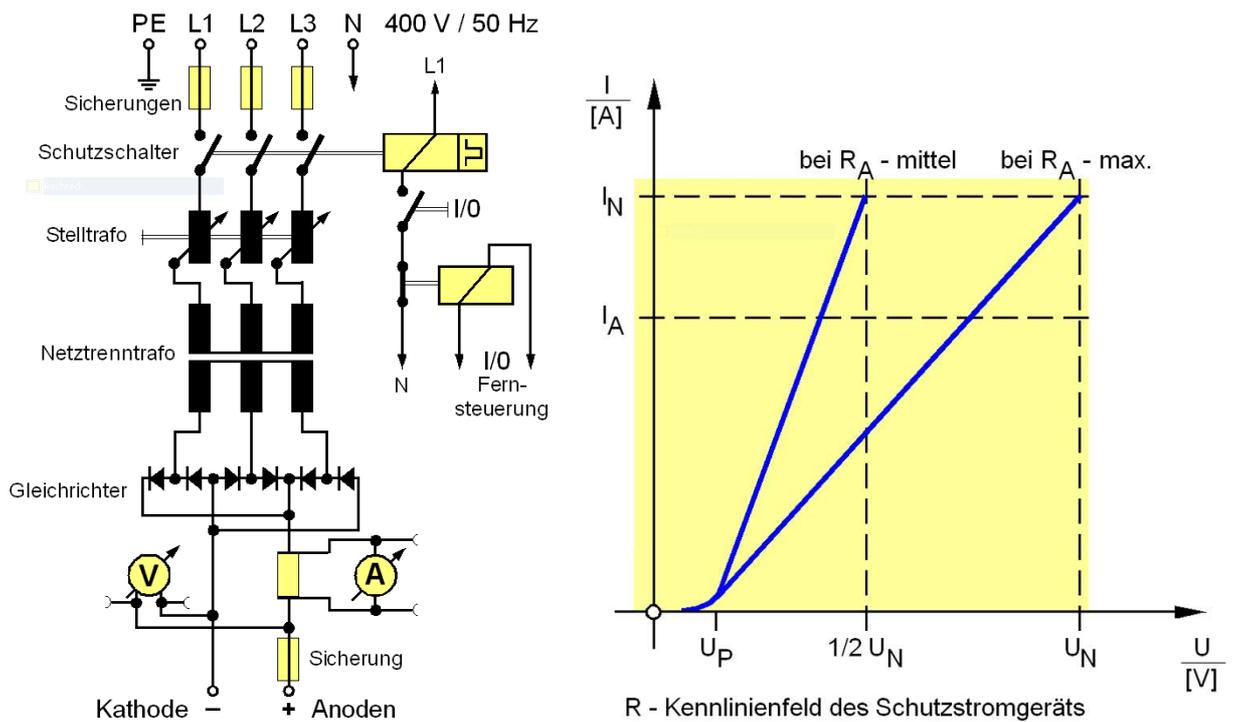
##### Von Hand einstellbare Geräte

Liegen Betriebsbedingungen vor, unter denen auf die Sekundärseite des Geräts keine oder nur unwesentliche Änderungen des Elektrolytwiderstands und des Schutzstrombedarfs einwirken können und die Potentiale nur unwesentlich schwanken, sind die preisgünstigen von Hand einstellbaren Geräte ausreichend (Abb. 11.13). Das ist überall dort der Fall, wo sich diese Einflüsse nicht oder nur langsam, z. B. jahreszeitlich, ändern. Das gilt überwiegend für Schutzanlagen innerhalb von Dock- und Schleusenhäfen an der See und in Süßwasserhäfen, teilweise auch in Tidehäfen und Häfen mit reinem Meerwasser außerhalb des Einflusses von Flussmündungen (Einschränkungen sind bei den automatisch regelnden Geräten aufgeführt).

Ein von Hand einstellbares Schutzstromgerät besteht im Wesentlichen aus den folgenden Baugruppen:

- Eingang mit Netzschütz ohne Selbsthaltung, Eingangssicherungen, thermischer/magnetischer Überstromautomat und EIN/AUS-Schalter;
- von Hand einstellbarer Ringkern- oder Säulenstelltransformator für die Einstellung der Netzspannung zwischen 0 und 100 % ;
- Trenntransformator zur Trennung des speisenden Netzes vom Sekundärkreis (galvanische Trennung). Dieser Transformator reduziert die Netzspannung auf die sekundär erforderliche Kleinspannung;
- Zwischensicherungen mit überflinker Charakteristik zum Schutz des nachgeschalteten Siliziumgleichrichters;
- Siliziumgleichrichter in Brückenschaltung mit Schutz gegen schädliche Spannungsspitzen;

- Strom- und Spannungsmessgeräte;
- Sekundärsicherungen mit überflinker Charakteristik;
- Sammelschienen oder Klemmen für den Anschluss der Anoden- und Kathodenleitungen;
- Gehäusetyp und Schutzart nach den Erfordernissen des Aufstellorts (z.B. aus GFK, hochwertig beschichtetem Stahlblech, Edelstahl).

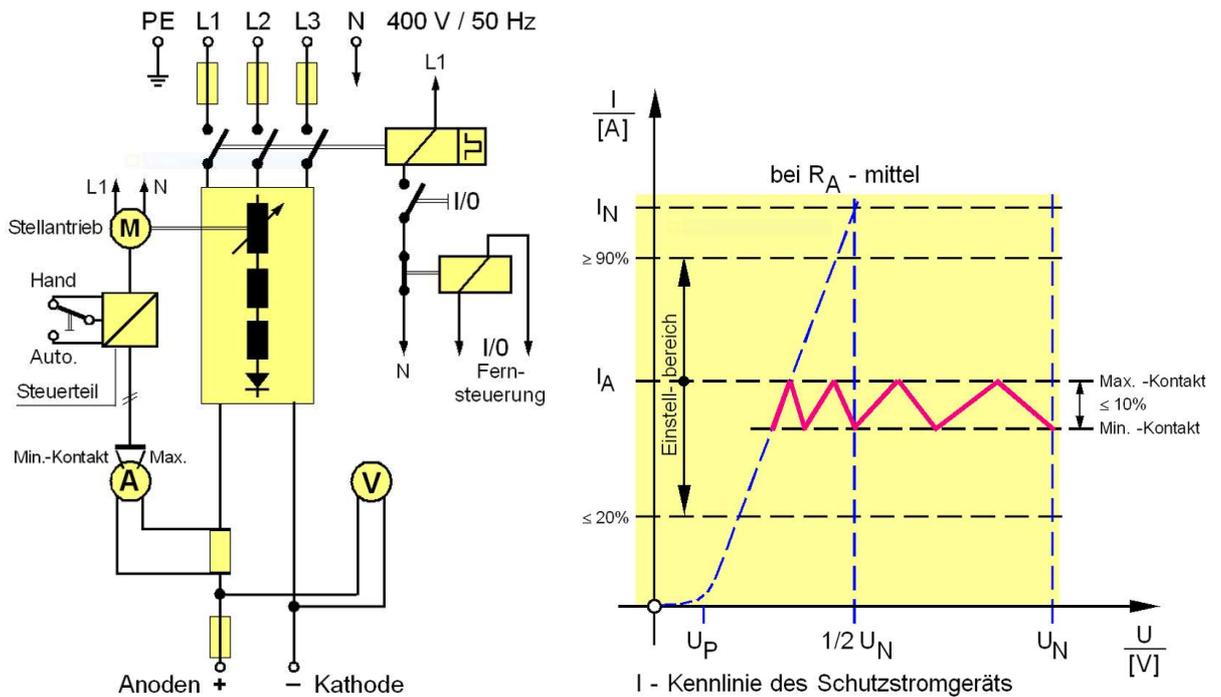


**Abb. 11.13:** Prinzipschaltbild für von Hand einstellbare Geräte

#### Automatisch stromregelnde Geräte

Automatisch stromregelnde Geräte (Abb. 11.14) werden dann benötigt, wenn bei erheblich wechselndem Elektrolytwiderstand zwischen den Anoden und der Kathode die Stromabgabe unzulässigen Schwankungen unterworfen ist. Das ist z. B. der Fall bei Tidehäfen im Einflussbereich von Flussmündungen. Hier schwankt der Salzgehalt des Brackwassers stark mit der Folge, dass ein Gerät mit konstanter Ausgangsspannung der Tidenkurve folgend zuviel oder zuwenig Schutzstrom abgeben würde.

In diesem Falle sind Geräte erforderlich, die einen im Bereich zwischen nahe 0 und 100 % einstellbaren Schutzstrom automatisch konstant halten. Das geschieht, indem über einen motorisch angetriebenen Stelltransformator oder einen elektronischen Spannungswandler die Ausgangsspannung dem Elektrolytwiderstand nachgeführt wird.



**Abb. 11.14:** Prinzipschaltbild für automatisch stromregelnde Geräte

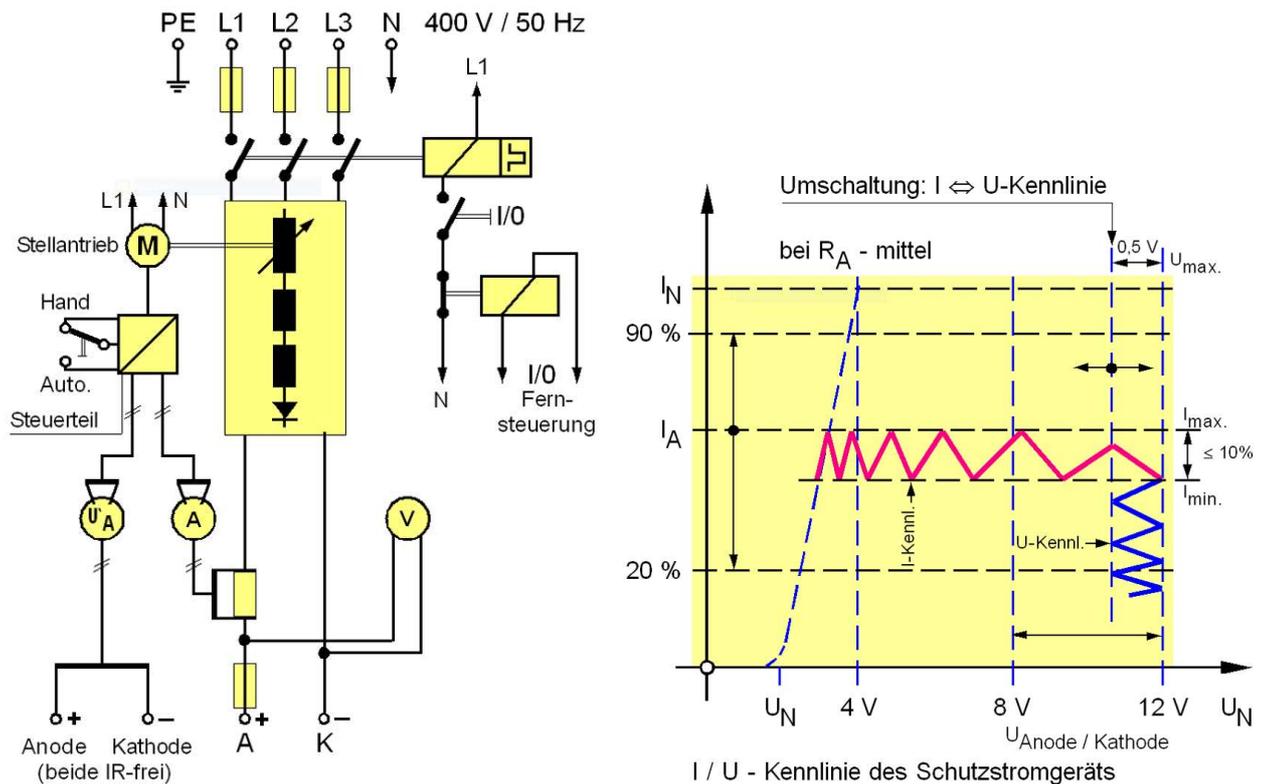
Diese Schutzstromgeräte sind zusätzlich mit den folgenden Baugruppen ausgerüstet:

- Motorantrieb für den Stelltransformator;
- Steuerlogik für die Automatik (Endschalter, Umschaltung Hand/Automatik);
- Einstellbare Minimum- und Maximumkontakte am Strommessinstrument als Geber für die Steuerlogik.

#### Automatisch stromregelnde/ spannungsbegrenzende Geräte

Für den Fall, dass an einem automatisch stromregelnden Schutzstromgerät spannungsempfindliche Anoden betrieben werden, ist ein Gerät erforderlich, das bei periodisch extrem ansteigendem Elektrolytwiderstand zusätzlich die Ausgangsspannung begrenzt (Abb. 11.15). Spannungsempfindlich sind Anoden aus mit Platin beschichtetem Titan (vergleiche Abschnitt 11.2.2.2, Abs. (4)).

Die stromregelnden/spannungsbegrenzenden Schutzstromgeräte halten bis zum Erreichen des eingestellten Spannungsmaximums den Strom konstant. Bei weiter ansteigendem Elektrolytwiderstand wird die Spannung limitiert und der Strom sinkt ab. Die Anodenanlage muss so ausgelegt sein, dass dieser Zustand nur vorübergehend auftritt, d.h. das aus der Spannungsbegrenzung resultierende Stromdefizit muss für die Schutzfunktion der Anlage tolerierbar sein.



**Abb. 11.15:** Prinzipschaltbild für automatisch stromregelnde/spannungsbegrenzende Geräte

Diese Geräte sind zusätzlich ausgerüstet mit:

- Spannungsmessinstrument mit einstellbaren Minimum- und Maximumkontakten als Geber für die Steuerlogik;
- Erweiterung der Steuerlogik zum Schutz bei Ausfall des Spannungsgebers bzw. Bruch der Anschlussleitungen.

#### Automatisch potentialregelnde Geräte mit träger Charakteristik

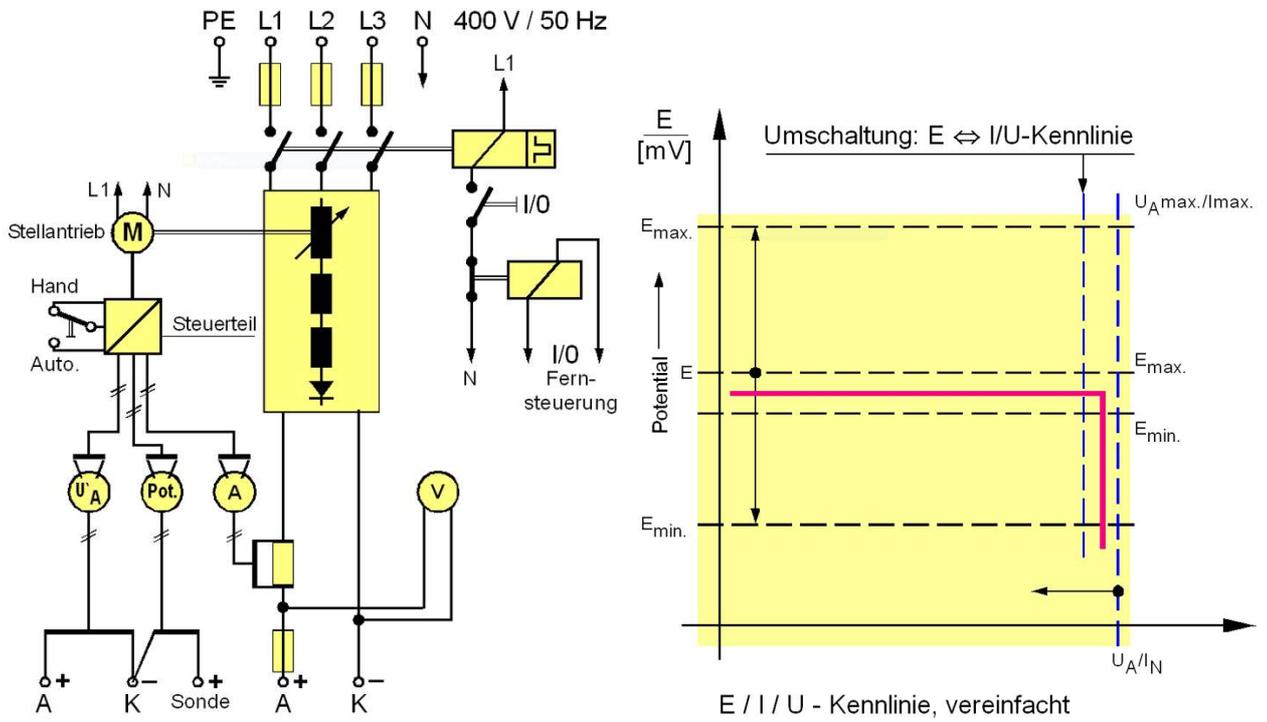
Ein konstanter Strom kann in Sonderfällen bei Änderung der Wasserverhältnisse (Elektrolytwiderstand, Wasserstand) unzulässige Potentialänderungen (Überschutz) verursachen.

Das ist der Fall bei voll oder überwiegend beschichteten Bauwerken, wenn das Verhältnis Fläche bei Hochwasser zu Fläche bei Niedrigwasser groß ist oder wenn es sich um beschichtete schwimmende Schutzobjekte oder Schleusen handelt.

An derartigen Bauwerken müssen langsame Potentialänderungen, die in der Größenordnung von Minuten (Schleusung) und Stunden (Tide) erfolgen, ausgeglichen werden.

Diese Geräte halten das von einer Steuerelektrode gemessene Potential zwischen den am Gerät eingestellten Grenzwerten konstant, bis der Schutzstrom das einstellbare Stromlimit (z. B. in Höhe des Gerätenennstroms) erreicht. Von diesem Punkt an wird der Strom konstant gehalten und das Potential kann zurückgehen. Wird zusätzlich (nur bei Anwesenheit spannungsempfindlicher Anoden) das

Spannungslimit erreicht, wird die Anodenspannung konstant gehalten und Strom und Schutzpotential gehen zurück. Die Anlage muss so ausgelegt sein, dass die Strom- und Spannungsautomatik nur in Ausnahmefällen anspricht (Abb. 11.16).



**Abb. 11.16:** Prinzipschaltbild für automatisch potentialregelnde Geräte mit träger Charakteristik

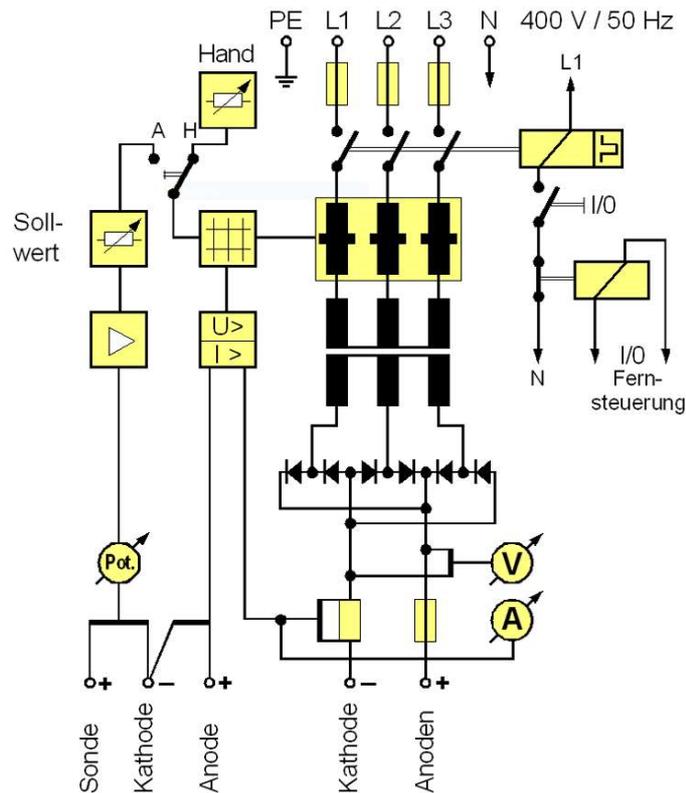
Dafür sind die Schutzstromgeräte zusätzlich mit folgenden Baugruppen ausgerüstet:

- Potentialmessinstrument mit Minimum- und Maximumkontakten,
- Erweiterung der Steuerlogik,
- Potentialautomatik ist der Strom- und Spannungsautomatik untergeordnet,
- Stromautomatik ist der Spannungsautomatik untergeordnet,
- Schutzfunktion bei Ausfall der Potential- und Spannungsautomatik (Bei Störung muss der Stelltransformator auf Null fahren).

#### Automatisch potentialregelnde Geräte mit schneller Charakteristik

Treten Streuströme aus benachbarten Gleichstromquellen wie Schweiß-, Bahn- oder Krananlagen auf, deren Ursachen nicht beseitigt werden können, sind die vorher genannten Geräte nicht ausreichend. Diese Streustromquellen können das Schutzobjekt durch Ströme mit sich sehr schnell ändernder Intensität beeinflussen. Darauf muss das Schutzstromgerät schnell, d. h. in der Größenordnung von 0,1 Sekunde reagieren. Dabei wird das eingestellte Potential konstant gehalten.





**Abb. 11.17b:** Prinzipschaltbild für automatisch potentialregelnde Geräte mit schneller Charakteristik

### Elektronisch geregelte Gleichrichter

Seit neuerem werden auch immer häufiger Schutzstromgeräte mit elektronischen Spannungswandlern eingesetzt, welche den Vorteil bieten, dass die Ausgangsspannung über eine Steuerspannung stufenlos von 0% - 100% gesteuert werden kann. Somit sind diese Geräte prinzipiell für alle oben genannten Anforderung durch den Einsatz einer digitalen Steuerung, z.B. Mikroprozessor, SPS (Speicherprogrammierbare Steuerung), geeignet.

Bei diesen Geräten ist jedoch auch auf eine ausreichende Absicherung (Überspannungsschutz) auf der Ausgangsseite zu achten, um die empfindlichere Halbleiterleistungselektronik zu schützen.

#### **11.2.1.2 Besondere Anforderungen**

Schutzstromgeräte sind oft erschweren Betriebsbedingungen ausgesetzt. Dazu gehören: hohe Luftfeuchte, erschwerte Kühlung, Überflutungsgefahr, tropische Bedingungen, beengte Raumverhältnisse, Staubablagerungen, Behinderung der Wartungsarbeiten u. ä. Oft ist auch mit Störungen aus dem speisenden Netz oder kurzzeitigen Netzunterbrechungen zu rechnen. Die von der Aufstellung her möglichen Einflüsse müssen sorgfältig erkundet, analysiert und bei Planung und Bau der Geräte berücksichtigt werden.

### 11.2.1.3 Besondere Ausrüstungen

- Schutz gegen kurzzeitige Netzausfälle, die Geräte müssen bei Netzurückkehr selbsttätig einschalten.
- Zur Messung der Ein-/Ausschaltpotentiale Fernsteuerrelais mit potentialfreien Kontakten wirkend auf das Netzschütz. Wirkungsweise des Relais bei Anschluss eines Intervallschaltgerätes:
- stromlos: Schutzstromgerät „ein“,
- angesteuert: Schutzstromgerät „aus“

Im Zustand „Schutzstromgerät aus“ muss eine vorhandene Automatik blockiert sein. Über Stunden anhaltende Ein-/ Ausschaltintervalle in rascher Folge (z. B. 15 Sek. ein / 3 Sek. aus) dürfen keine schädlichen Auswirkungen auf das Schutzstromgerät haben.

- Bei Bedarf: Schutz gegen schädliche Netzeinflüsse. Beim Auftreten starker Spannungsschwankungen muss der Gleichrichterkreis ausreichend überdimensioniert sein. Die Versorgungsspannung der Automatik muss ggf. gegen Überspannungen geschützt und stabilisiert werden.
- Bei Bedarf: Schutz gegen Oberwellen im speisenden Netz. Sind im speisenden Netz oberwellenerzeugende Verbraucher vorhanden, reagieren die Trenntransformatoren mit einer stark erhöhten Wicklungstemperatur. In diesem Falle müssen die Transformatoren mit Isolierstoff Klasse H, bis 1800 C isoliert werden. Die Versorgungsspannung der Automatik muss ggf. gegen Überspannungen geschützt und stabilisiert werden.
- Obligatorisch:
  - Messbuchsen für Ausgangsspannung parallel zum Spannungsmessinstrument (alle Gerätetypen);
  - Messbuchsen für Ausgangsstrom parallel zum Strommessinstrument (alle Gerätetypen);
  - Messbuchsen für Potential parallel zum Potentialmessinstrument (potentialregelnde Geräte);
  - Service-Steckdose, benutzbar auch bei ausgeschaltetem Gerät.

### 11.2.1.4 Bemessungsgrundlagen

Grundlegend wird der Auslegungsnennstrom und die Nennspannung nach den Gleichungen Gl. 11. und Gl. 11. 2 berechnet, welche im Abschnitt Schutzstrombedarf (11.3.2) näher erläutert werden.

$$I_N = I_A (\text{max}) \cdot k \quad \text{Gl. 11.1)}$$

$$U_N = U_P + U_R + U_L \quad \text{Gl. 11.2)}$$

Schutzstromgeräte und Anoden bzw. Schutzobjekt.

## 11.2.2 Anoden und Anodenhalterungen

Bei Fremdstromanlagen werden zwei Grundarten von Anoden benutzt: Solche, die einem hohen Materialabtrag und solche, die einem extrem niedrigen Abtrag unterworfen sind. Letztere werden als inerte (reaktionsträge) Anoden bezeichnet. Das unterschiedliche Verhalten der beiden Typen beruht auf den elektrochemischen Vorgängen an den Anoden.

### 11.2.2.1 Elektrochemische Vorgänge an den Anoden

Bei Fremdstromanlagen sind die zu schützenden Objekte mit dem negativen, die Anoden mit dem positiven Pol des Gleichrichters verbunden (s. Abschnitt 6.1.3). Dem Anodenmaterial werden demnach Elektronen entzogen.



Diese Reaktion entspricht dem anodischen Teilschritt der Korrosion (s. Abschnitt 5.2.3). Dabei findet an der Anode ein Materialabtrag nach dem Faradayschen Gesetz statt (z. B. löst ein elektrischer Strom von 1 A in 1 Jahr etwa 10 kg Eisen auf). Da Fremdstromanoden im Allgemeinen mit hoher Stromdichte belastet sind, wären als Folge demnach ein starker Materialabtrag und damit eine geringe Lebensdauer zu erwarten.

Für Anoden, die sich entsprechend der Stromabgabe unter hohem Materialabtrag wie Opferanoden auflösen, kommt aus Kostengründen lediglich Stahlschrott in Betracht. Dieser wird jedoch nur noch in Ausnahmefällen eingebaut (s. auch Abschnitt 11.2.2.2).

Für inerte Anoden eignen sich dagegen Metalle oder Metalllegierungen, die entweder selbst schwer löslich sind oder an der Oberfläche schwerlösliche Reaktionsprodukte bilden. Die Oberflächenschichten müssen in der Lage sein Elektronen zu leiten.

An inerten Anoden wird die Materialauflösung zugunsten einer Gasentwicklung zurückgedrängt. Im Süßwasser werden Hydroxylionen unter Sauerstoffbildung entladen.



In Brack- und Meerwasser tritt mit steigender Salzkonzentration diese Reaktion gegenüber der Chlorentwicklung zurück:



Ist das Entweichen des gebildeten Chlors z. B. durch Schlammüberdeckung behindert, so kann noch eine Folgereaktion eintreten, bei der neben Sauerstoff noch Salzsäure entsteht, die auf Anoden (und in Sonderfällen auf das Bauwerk selbst) schädigend einwirken kann.



Inerte Anoden werden vor allem aus Graphit, Eisensilizium, Magnetit und platinieren Werkstoffen wie Titan, Niob bzw. Tantal hergestellt.

### 11.2.2.2 Fremdstromanoden

Profil- und Schienenstahlschrott eignet sich zur Herstellung von Anoden mit großer Oberfläche. Der Schrott ist gegenüber fertig konfektionierten Anoden preiswert und erfordert zur Stromabgabe nur eine geringe Betriebsspannung. Die Anwendung ist jedoch auf Anlagen mit wenigen Anoden bzw. mit einer Zentralanode beschränkt. Zu beachten ist, dass die Schrottprofile wegen der ungleichmäßigen Auflösung (s. Abschnitt 11.2.2.1) relativ schnell durchrosten und zerfallen. Deshalb müssen beachtliche Mengen an Schrott versenkt werden. Im Bereich der Anode kann sich das Wasser durch laufend ausgefälltes Eisenhydroxid etwas verfärben.

- Abtrag: ca. 10 kg/A pro Jahr bei 50 % Ausnutzung
- Belastbarkeit: abhängig von der Form der Oberfläche  
Anodendichte niedrig halten (3 - 30 A/m<sup>2</sup>) und  
kompakte Anodenform wählen.
- Einsatzbereich: alle Wässer

#### Graphit-Anoden

Graphit findet sich in natürlichen Vorkommen oder wird industriell erzeugt. Er wird so aufbereitet, dass sich gewünschte Eigenschaften erzielen lassen. Da die Anoden spröde sind, sollen sie nur dort installiert werden, wo mechanische Beanspruchungen auszuschließen sind. Als Blockanoden eignen sie sich zur Verlegung auf Grund.

Die Graphitanoden werden in Süßwasser durch die Einwirkung des bei der Wasserzersetzung entstehenden Sauerstoffs (s. Abschnitt 11.2.2.1) unter Bildung von Kohlendioxid verhältnismäßig stark angegriffen. Im chloridhaltigen Meer- und Brackwasser reagiert das freiwerdende Chlor nur, wenn es z. B. durch Schlammbedeckung nicht entweichen kann (Tab. 11.1). Die Anoden sollen daher stets vom Wasser umspült sein.

Form	zylindrische <b>Stabanoden:</b> bis zu 15 cm, Länge bis zu 200 cm, Gewicht bis zu 40 kg <b>Blockanoden:</b> in Form und Größe nach Bedarf
Belastbarkeit	möglich 10 bis 100 A/m <sup>2</sup> empfohlen 10 bis 50 A/m <sup>2</sup>
Abtrag	von der Belastung und dem Einsatzbereich abhängig (im Meerwasser geringerer Verbrauch) 30 bis 200 g/A Jahr (bis 450 g/A möglich).
Besonderheiten für den Einsatz	nicht für Süßwasser

**Tabelle 11.1:** Eigenschaften von Graphit-Anoden

### Eisensilizium-Anoden

Eisensilizium als Anodenwerkstoff muss mindestens 14% Silizium enthalten. Die Anoden aus Eisensilizium sind hart und sehr spröde. Sie müssen wie Graphitanoden vor Beschädigungen geschützt werden. Blockanoden und große Stabanoden eignen sich auch bedingt für die Verlegung auf Grund.

In Süßwasser schützen sich die Eisensiliziumanoden durch Ausbildung einer elektronenleitenden Schicht auf der Basis von Eisen- und Siliziumoxiden. Der Materialabtrag wird zurückgedrängt.

Im Meerwasser entstehen mit dem gebildeten Chlor leichtlösliche Chloride. Die Anode ist daher für den Einsatz im Meerwasser nur dann geeignet, wenn spezielle Legierungen mit Molybdän oder Chromzusätzen verwendet werden (Tab. 11.2).

Form	zylindrische <b>Stabanoden:</b> von 3 – 10 cm, Länge von 25 bis 150 cm, Gewicht bis 85kg <b>Kugelkalotten:</b> bis zu 70 cm, Dicke bis zu 12 cm, Gewicht bis zu 30 kg <b>Blockanoden:</b> Kantenlängen bis zu 30 cm, Gewicht bis zu 200 kg, Sondergrößen nach Bedarf
Belastbarkeit	möglich bis 150 A/m <sup>2</sup> (im Meerwasser bis 50 A/m <sup>2</sup> )
Abtrag	stark belastungsabhängig 90 bis 250 g/A Jahr
Besonderheiten	geeignet für Süßwasser; für Auslagerung für den Einsatz; im Brack- und Meerwasser sind Anoden mit Chrom- oder Molybdänzusatz auszuwählen

**Tabelle 11.2:** Eigenschaften von Eisen-Silizium-Anoden

### Magnetit-Anoden

Magnetit mit geringen Mengen zulegerter anderer Mineralien wird in Form von Stabanoden verwendet (Tab. 11.3). Die Stabkörper sind spröde und mechanisch nur begrenzt beanspruchbar.

Form	zylindrische <b>Stabanoden:</b> Ø 6 cm, Länge von 30 bis 92 cm, Gewicht bis 9 kg Das Anschlusskabel ist eingegossen.
Belastbarkeit	10 bis 15 A/m <sup>2</sup> je Anode entsprechend 100 bis 150 A/m <sup>2</sup> Bei Stromüberschreitungen werden die Anoden schnell zerstört. hochspannungsbelastbar, Begrenzung nur durch Sicherheitsvorschriften (VDE 0100/410).
Abtrag	gering, 1,5 bis 2,5 g/A Jahr. Bei niedrigerem Stromverbrauch sind die Abtragsraten kleiner.
Besonderheiten für den Einsatz	Einsatz in allen Wässern und Böden. Unempfindlich gegen Angriff durch Chlor und Sauerstoff.

**Tabelle 11.3:** Eigenschaften von Magnetit-Anoden



### Platinierte Anoden

Edelmetalle der Platingruppe sind wegen ihres außerordentlich geringen Abtrags und ihrer hohen Belastbarkeit als Anoden besonders gut geeignet. Als gängiges industrielles Material kommt vor allem Platin in Betracht. Aus wirtschaftlichen Gründen sind jedoch massive Platinanoden nicht vertretbar. Deshalb wird das Platin nur in dünner Schicht auf geeignete Trägermaterialien aufgebracht. Hierfür werden Titan, Niob (Columbium) und Tantal verwendet. Diese Metalle schützen sich an den nicht platinieren Oberflächen (z. B. Poren, mechanische Beschädigungen usw.) durch eine dichte, nicht elektronenleitende Oxidschicht vor Auflösung.

Die üblichen Platinschichtdicken liegen zwischen 2,5 und 10  $\mu\text{m}$ . Der Platinabtrag beträgt 0,008 g/A Jahr (Tab. 11.4).

### Platiniertes Titan

Form	zylindrische <b>Stabanoden</b> aus Titanrohren $\varnothing$ 1,0 – 2,5 cm, Wanddicke 1 bis 2 mm, Länge 100 zu 150 cm Für spezielle Anwendungen: Flachanoden aus 1 bis 2 mm dickem Titanblech, Breiten bis 10 cm, Längen bis 300 cm; Drahtanoden mit 2 – 3 mm Durchmesser
Belastbarkeit	hochstrombelastbar mit 500 bis 700 A/m <sup>2</sup> .*) Die Treibspannung darf 10 bis 12 V nicht übersteigen, da dann die schützende Oxidschicht durchbrochen und der Titankörper zerstört wird.
Besonderheiten für den Einsatz	Zylindrische Stabanoden werden im Salz- und Süßwasser eingesetzt. Sie sind für die Verlegung auf Grund nicht geeignet. Das gilt auch, wenn im Wasser mit Sandschliff zu rechnen ist. Flach- und Drahtanoden werden in speziellen Einsatzgebieten angewendet, z. B. bei Schiffen und bei Anlagen, bei denen Anodenreaktionsprodukte unerwünscht sind.

\*) Nach neueren Erkenntnissen sollten in der Praxis 200 A/m<sup>2</sup> nicht überschritten werden

**Tabelle 11.4:** Eigenschaften von platinieren Anoden

### Platinierter Niob und platinierter Tantal

Belastbarkeit: Der wesentliche Unterschied zu den platinieren Titananoden besteht nur in der Ausnutzbarkeit höherer Treibspannungen; Platin-Niob bis 50 V, Platin-Tantal bis 180 V, wobei die Sicherheitsbestimmungen (VDE 0100/410) einzuhalten sind.

Besonderheiten für den Einsatz: Wirtschaftlich nur einsetzbar, wenn hohe Treibspannungen oder sehr kleine Anoden im Süßwasser benötigt werden.

### Metalloxidbeschichtete Titan-Anoden

Anstelle von Platin kann Titan-Trägermetall auch mit einem elektronenleitenden, rekristallisiertem Metalloxidgemisch beschichtet werden. Das chemische und physikalische Verhalten der Oberfläche entspricht dem der Eisensilizium- und der Magnetitanoden. Bei hoher chemischer Beständigkeit tritt nur eine extrem niedrige und gleichmäßige Abtragsrate auf (Tab. 11.5).

Form	zylindrische <b>Stabanoden</b> aus Titanrohren, $\varnothing$ 1,6 bis 2,5 cm, Länge von 25 bis 100 cm, Aktive Oberfläche von 0,01 bis 0,08 m <sup>2</sup> ; netzformige Anoden aus Titandraht, Breite von 1,6 bis 8,0 cm, Länge von 50 bis 125 cm, Aktive Oberfläche von 0,02 bis 0,16 m <sup>2</sup>
Belastbarkeit	hochstrombelastbar; im Süßwasser 50 bis 150 A/m <sup>2</sup> , im Seewasser 500 bis 800 A/m <sup>2</sup> *)

\*) Nach neueren Erkenntnissen sollten in der Praxis 200 A/m<sup>2</sup> nicht überschritten werden

### **Tabelle 11.5:** Eigenschaften von metallbeschichteten Titananoden

Die nach dem heutigen Stand der Technik zur Anwendung kommenden Fremdstrom-Anodenwerkstoffe sind nachfolgend aufgeführt:

- Eisen Silizium-Chrom
- Magnetit
- platinierter Titan/Niob/Tantal
- metalloxidbeschichtetes Titan

Die früher noch gelegentlich verwendeten Graphit- und Blei/Silber-Anoden kommen aus den verschiedensten Gründen heute praktisch nicht mehr zum Einsatz.

Die nachfolgende Tabelle 11.6 zeigt die wichtigsten Charakteristiken der oben genannten Anodenwerkstoffe:

		<b>Eisen-Silizium-Chrom</b>	<b>Magnetit</b>	<b>Platinierte Titan/Niob/Tantal</b>	<b>Metalloxid-beschichtetes Titan</b>
Abtragsrate	g/A•a	500	20	0,08	0,04
Ausnutzung	%	90	90	90	90
max. Stromdichte	A/m <sup>2</sup>	50	70	600	600
Spannungsbegrenzung	V	keine	keine	12/40/80	12

**Tabelle 11.6:** Vergleich verschiedener Anodentypen

Abhängig vom jeweiligen Bauwerk und Korrosionsschutzsystem können grundsätzlich alle Anodenwerkstoffe eingesetzt werden. Jedoch spricht aus wirtschaftlichen Gründen (Verhältnis Preis/Lebensdauer) und auch aus technischen Gründen (nahezu unbegrenzte Einsatzmöglichkeiten) sehr viel für die Magnetit Anode.

Bei der Bauform und Anordnung von Anodenhalterungen sind folgende Faktoren zu berücksichtigen:

- Geometrie des Bauwerkes
- Wasserverhältnisse
- Strömung und Eisgang
- Anlegende Schiffe
- leichte Auswechselbarkeit der Anoden

Bauform, Konstruktion und Anordnung werden in der Planungsphase für das jeweilige Bauwerk festgelegt.

### 11.2.3 Bezugselektroden und Halterungen

Für die Überwachung und Regelung von Korrosionsschutzanlagen werden permanente Referenzelektroden eingesetzt.

Die heute üblichen Referenzelektroden und deren wichtigste Charakteristiken sind nachfolgend in Tab. 11.7 aufgelistet:

		<b>Kupfer/Kupfer Sulfat</b> (Cu/CuSO <sub>4</sub> )	<b>Zink</b> (Zn)	<b>Silber/Silber Chlorid</b> (Ag/AgCl)
Bauart		Feststoff	Feststoff	Feststoff
Potential bez. auf H <sub>2</sub> -Elektrode	V	+ 0,32	- 0,77	+ 0,22
Temperaturbereich	°C	0 bis +57	0 bis +57	0 bis +57
Potentialstabilität	V	keine	keine	12/40/80

**Tabelle 11.7:** Charakteristiken von Referenzelektroden

Daraus ist zu erkennen, dass nur noch Feststoff-Elektroden verwendet werden, die sich neben der langen Lebensdauer auch durch gute Potentialstabilität auszeichnen.

Für die Elektrodenhalterungen gelten in Bezug auf Bauform dieselben Kriterien wie für die Anodenhalterungen. Bei der Anordnung sollte darauf geachtet werden, dass sowohl die Potentiale im Bereich des Spannungstrichters der Anoden als auch an den Überschneidungen der Schutzbereiche gemessen werden können.

### 11.2.4 Kabel, Kabelverbindungen und Schutzrohre

Als Verbindungskabel zu Kathoden, Anoden und Elektroden werden im Überwasserbereich standardmäßige ein- oder mehradrige Kunststoffkabel vom Typ NYY verwendet.

Bei größerer mechanischer Belastung und im Unterwasserbereich sollten mittelschwere Gummischlauch-Leitungen vom Typ NSHÖU zum Einsatz kommen.

Ein besonderes Problem kann im Bereich von Anoden auftreten an denen kein Wasseraustausch stattfindet oder im Schlick. Durch die chemischen Reaktionen an den Anoden konzentriert sich das Medium in deren Umkreis stark auf, was eine Übersäuerung des umgebenden Mediums und auch Chlorgasbildung zur Folge haben kann. In solchen Fällen ist es empfehlenswert, säure- und chlorgasbeständiges PVDF-Kabel zu verwenden.

Für die Einleitung des Schutzstroms in die Anoden und die Rückleitung sind Kabelkanäle, Ziehrohre für Anoden- und Kathodenleitungen und ggf. Schächte einzuplanen. Die Hauptkabel weisen oft erhebliche Durchmesser auf und müssen bei symmetrischen Verkabelungen mehrfach parallel verlegt werden. Als Anhalt können folgende Mindestmaße gelten:

Hauptkabelkanäle:	50 x 50 cm;
Hauptziehrohre:	Ø 200 mm;
Leerrohre zu Anoden:	Ø 40 mm;
Flachschächte:	60 x 60 cm;
Einstiegsschächte:	100 x 100 cm.

### **11.2.5 Klemm- und Verbindungskästen**

Auf Klemm- und Verteilerkästen sollte, wenn nicht trockene und überflutungssichere Räume zur Verfügung stehen, verzichtet werden.

Bei Verwendung von Klemm- und Verteilerkästen ist auf robuste und korrosionsbeständige Ausführung zu achten.

### **11.2.6 Überwachungs- und Steuerungssysteme**

Die Art der Regelungs- und Überwachungsmöglichkeit von Korrosionsschutzanlagen ist stark mit dem erforderlichen Personaleinsatz während des Betriebes verbunden. Je nach Größenordnung und Komplexität der Anlage muss jeweils individuell entschieden werden, welche Maßnahmen diesbezüglich sinnvoll sind.

Nachfolgend aufgeführte Regel- und Überwachungseinheiten können zur Anwendung kommen:

#### A - Überwachung der Schutzanlagen

Hierbei werden die Einschaltpotentiale von den Schutzanlagen und gegebenenfalls anderen ausgewählten Messpunkten zu einer Messwarte übertragen. Es ist auch möglich den Gesamtschutzstrom und Anodeneinzelströme zu übertragen.

Um die Schutzfunktion einer Anlage beurteilen zu können, reicht es jedoch meistens aus, das Potential zu überwachen. Die übertragenen Werte können über Grenzwertfühler auf einen Sammelalarm geschaltet werden.

#### B - Fernsteuerung und Überwachung der Schutzanlagen

Hierbei wird zusätzlich zur Überwachung die Möglichkeit geschaffen, den Schutzstrom der Anlagen zu steuern und auch über eingebaute Schaltuhren die Anlagen rhythmisch zu schalten, was eine Überprüfung der Ausschaltpotentiale ermöglicht.

## C - Rechnergestützte Steuerung und Überwachung

Rechnergestützte Steuerungen und Überwachungen werden heute bei komplexen Schutzsystemen eingesetzt. Der Vorteil solcher Anlagen liegt in der Vielfalt der technischen Möglichkeiten, die nachfolgend hinsichtlich der Auswahl der Regelung aufgelistet sind:

spannungskonstant, stromkonstant oder potentialregelnd

sowohl bei der Planung als auch im Nachhinein durch Änderung der Software.

Die menügeführten Funktionsabläufe können graphisch dargestellt und über Funktionstasten ausgeführt werden. Zum Beispiel:

- Bauwerk mit Schutzbereichen
- Schutzströme aller Anlagen
- Anoden-Einzelströme
- Potentiale

Ferner sind frei wählbare Abspeichermöglichkeit aller Betriebsdaten auf Datenträger und somit durchgehende Dokumentation, Automatische Erstellung von Messprotokollen und Analyse und Steuerung der Anlage über Modemanschluss möglich.

### **11.3 Berechnungen und Dimensionierung**

#### **11.3.1 Oberflächen**

Für die Dimensionierung der KKS-Anlage ist die Größe, Art und Bereiche der zu schützenden Objekte und die daraus resultierenden Schutzstromdichten wichtig. Dabei sind die Flächen zu berücksichtigen, die bei Hochwasserstand mit Wasser benetzt sind oder im Grund eingelassen sind. Es sind die „echten“ Oberflächen zu nehmen. So muss bei Spundwänden auch die Art des Profils mit einem entsprechenden Profilkfaktor beaufschlagt werden.

Neben der Größe der Fläche geht die Art der Fläche (Stahl, beschichtet oder unbeschichtet, Stahlbeton) sowie der Bereich der Flächen (Spritzwasserzone, Wasserwechselzone, Gewässersohle, Schlick, Grund, s. Abschn. 7.3.3) in die Berechnung der KKS-Anlage ein.

#### **11.3.2 Schutzstrombedarf**

Grundlage der Dimensionierung einer KKS-Anlage bildet die Schutzstrombedarfsberechnung. Dabei wird der entsprechende Schutzstrombedarf pro Meter Wandlänge oder pro Pfahl je nach Gegebenheiten (Beschichtung ja/nein, Wassertiefen, Rammtiefen) berechnen (s. Abschn. 7.3.3/9.1.5) und damit dann der Gesamtstrombedarf der Anlage durch Multiplikation des Schutzstrombedarfs mit der Gesamtlänge oder Gesamtanzahl der Pfähle bestimmen.

Der so ermittelte Schutzstrombedarf pro m Wand oder pro Pfahl dient nur als Bemessungsgrundlage für die Auslegung der Schutzstromgeräte und Anoden. Er entspricht dem zukünftig zu erwartenden Betriebsstrom. Der Strombedarf im Neuzustand der Anlage kann durchaus nur bei 1/10 des Bemessungsstroms liegen.

### 11.3.3 Anzahl der Schutzbereiche

Nach der Bestimmung des Schutzstrombedarfs geht es darum, diesen Schutzstrom gleichmäßig auf das Bauwerk zu verteilen. Dabei ist bei größeren Bauwerken der Schutz über mehrere KKS-Anlagen, jeweils bestehend aus einem Schutzstromgerät, Anoden und Referenzelektroden, aus wirtschaftlichen und technischen Gründen meistens sinnvoller.

Dabei ist zuerst die Geometrie des Bauwerkes zu berücksichtigen und die Anlagen so zu verteilen, dass keine Bereiche im Stromschatten liegen. Des Weiteren müssen mögliche Aufstellungsorte der Schutzstromgeräte sowie Art und Länge der Kabelwege, Kabelquerschnitte und daraus resultierende Leitungsverluste/ Kabelwiderstände berücksichtigt werden.

### 11.3.4 Anzahl und Ausgangsleistung der Schutzstromgeräte

Die Anzahl der Schutzstromgeräte ist abhängig von der Anzahl der bestimmten Schutzbereiche. Dabei ergibt sich die benötigte Ausgangsspannung aus folgender Formel:

$$U_N = U_P + U_R + U_L \text{ [V]} \quad \text{Gl. 11.7)}$$

$U_N$  = Nennspannung [V]

$U_P$  = Polarisationsgegenspannung Anode/Kathode [V] =

- max. 2,4 V bei FeSi-, Magnetit-, Blei/Silber- und Platinanoden;

- max. 1,0 V bei Eisen-Schrott-Anoden;

$U_R$  = Anodenspannung aus Anodenausbreitungswiderstand ( $R_A$ )  
im Elektrolyten und Anodenstrom ( $I_A$ ) :

$$U_R = R_A \cdot I_A;$$

$R_A$  ist abhängig von Anodenform und Leitfähigkeit des Elektrolyten;

$U_L$  = Verluste durch Spannungsfälle in den Leitungen zwischen  
Schutzstromgeräte und Anoden bzw. Schutzobjekt.

Der Nennstrom des Schutzstromgerätes sollte so bemessen sein, dass nicht nur der errechnete Schutzstrom auch bei Alterung des Schutzobjektes abgegeben werden kann, sondern dieser Nennstrom sollte mit einem entsprechenden Faktor  $k$  multipliziert werden, welcher den erhöhten Strom während der Vorpolarisation berücksichtigt und auch die Lebensdauer des Gerätes erhöht.

$$I_N = I_A (\text{max}) \cdot k \text{ [A]}$$

**Gl. 11.8)**

$I_N$  = Auslegungsnennstrom 100 % ED (Dauerbetrieb) [A]

$I_A (\text{max})$  = maximale theoretische Anodenstromabgabe bei polarisierter Kathodenfläche [A]

$k$  = Faktor für Erhöhung des Stroms bei der Vorpolarisation und der Lebensdauer:

- bei unbeschichteten Schutzobjekten:  $k = 2,0$ ;

- bei beschichteten Schutzobjekten:  $k = 1,5$ .

### **11.3.5 Erforderliche Anodenlebensdauer**

Prinzipiell kann die theoretische Lebensdauer der Anoden die Lebensdauer des Bauwerkes erreichen, d.h. 60 Jahre und mehr.

Da die Anoden aber außerdem durch den Anodenstrom hervorgerufenen Verbrauch, angegeben in der Abtragsrate (in  $\text{kg}/(\text{A} \cdot \text{Jahr})$ ), auch noch anderen Einflüssen, wie Wellenschlag, Eisgang, etc. ausgesetzt sind, welche die Lebensdauer der Anoden begrenzen, wird normalerweise eine Anodenlebensdauer von 20 Jahren für die Planung zu Grunde gelegt.

Dabei sollte bei der Planung der KKS-Anlage darauf geachtet werden, dass die Anoden nach Ablauf der geplanten Lebensdauer auch mit möglichst geringem Aufwand ausgetauscht werden können, z.B. durch den Einsatz von gut zugänglichen Schutzrohren, in denen die Anoden von über Wasser eingelassen werden können.

### **11.3.6 Auswahl und Dimensionierung der Anoden**

Für die Auswahl der Anoden gibt es keine verbindliche Richtlinie. Es sind die entsprechenden Umgebungs- und Einsatzbedingungen zu berücksichtigen.

Allgemein haben sich jedoch Magnetitanoden, platinierte Anode (wobei die Spannungsbegrenzung bei platinieren Titananoden von 10V bis 12V zu berücksichtigen ist) und metalloxidbeschichtete Titananoden im Seewasser bewährt.

Bei der Dimensionierung der Anoden wird die geplante Lebensdauer, die maximale Stromabgabe und der erforderliche Ausbreitungswiderstand (s. Abschnitt 11.3.7) berücksichtigt.

Zur Bestimmung der benötigten Masse rechnet man:

$$R = \frac{\rho}{2\pi \cdot L} \left( \ln \frac{4L}{r} - 1 \right) [\Omega] \quad \text{GI 11.9)}$$

R = Ausbreitungswiderstand einer Stabanode ( $d \ll L$ ) in [ $\Omega$ ]

P = Spezifischer Widerstand des Wassers in [ $\Omega \cdot m$ ]

L = Länge der Anode in [m]

D = Durchmesser der Anode in [m]

### 11.3.7 Ausbreitungswiderstand einer Anode

Den Ausbreitungswiderstand einer Stabanode (Durchmesser  $\ll$  Länge) kann man mit Hilfe der folgenden Formel berechnen:

$$R = \frac{\rho}{2\pi \cdot L} \left( \ln \frac{4L}{r} - 1 \right) \quad \text{GI 11.10)}$$

R = Ausbreitungswiderstand einer Stabanode ( $d \ll L$ ) in [Ohm];

p = Spezifischer Widerstand des Wassers in [Ohm  $\cdot$  m];

L = Länge der Anode in [m]

d = Durchmesser der Anode in [m]

Die Gleichung gilt für Anoden mit einem Mindestabstand von 0,30 m vom Objekt.

Bei einem Abstand von 0,15 m bis 0,30 m muss der Wert mit einem Faktor 1,3 korrigiert werden.

### 11.3.8 Schutzbereich einer Anode

Aus der Art der zu schützenden Fläche (Spundwand, Stahlbeton) kann man den spezifischen Schutzstrom pro Länge unter der Berücksichtigung der Tabelle aus Abschn. 9.1.6 bestimmen.

Damit ergibt sich der Schutzbereich einer Anode aus:

$$S_A = \frac{I_A}{i_S} [\text{m}] \quad \text{GI. 11.11)}$$

S<sub>A</sub> = Schutzbereichslänge einer Anode in [m]

I<sub>A</sub> = Anodennennstrom in [A]

i<sub>S</sub> = Spezifischer Schutzstrom des Objektes in [A / m]

Man muss bei der Positionierung der Anoden darauf achten, dass die jeweiligen Anodenschutzbereiche sich überlappen, um einen ausreichenden Schutz der gesamten Fläche zu erreichen.

### 11.3.9 Berechnung der Gesamtanodenzahl eines Schutzbereiches

Zur Berechnung der Gesamtanodenzahl teilt man den berechneten Gesamtstrom des Schutzbereiches durch den Anodennennstrom und erhält die Mindestanzahl der notwendigen Anoden.

Die tatsächliche Anzahl der Anoden ist zudem abhängig von der Bauwerksgeometrie und der daraus resultierenden Stromverteilung, darf jedoch die o. g. Mindestanzahl nicht unterschreiten.

$$N_A \geq \frac{I_{Ges}}{I_A} \quad \text{Gl. 11.12)}$$

$N_A$  = Mindestanodenanzahl

$I_{Ges}$  = Gesamtstrom des Schutzbereiches in [A]

$I_A$  = Anodennennstrom in [A]

### 11.3.10 Errechnete Lebensdauer der Anodenanlage

$$L_A = uf \cdot \frac{m_A}{I \cdot C} [\text{Jahr}] \quad \text{Gl. 11.13)}$$

$L_A$  = Anodenlebensdauer in [Jahr];

$uf$  = Anodennutzungsfaktor (meist 0,9);

$m_A$  = Anodenmasse in [kg]

$I$  = Anodenstrom (Auslegungsstrom der Anode) in [A]

$C$  = Abtragsrate der Anode in kg/(A • Jahr)

### 11.3.11 Auswahl und Anzahl der Referenzelektroden

Zur Überwachung und Regelung von Korrosionsschutzanlagen werden dauerhaft installierte Referenzelektroden eingesetzt.

In der Praxis werden die Typen Zink, Cu/CuSO<sub>4</sub> ges. und Ag/AgCl eingesetzt.

Pro Schutzbereich sollten aus Redundanzgründen mindestens zwei Referenzelektroden eingesetzt werden.

Falls der Schutzbereich potentialgeregelt wird, ist der Einsatz von mindestens zwei Referenzelektroden zu empfehlen, um einen Über- oder Unterschut durch eine fehlerhafte oder driftende Referenzelektrode zu verhindern. Dabei werden die Potentialwerte der Referenzelektroden miteinander verglichen und eine zu starke Abweichung der Werte signalisiert. Eine Regelung muss dann dementsprechend reagieren.

### 11.3.12 Auswahl der Kabeltypen

Als Verbindungskabel zu Kathoden, Anoden und Referenzelektroden werden im Überwasserbereich standardmäßig ein- oder mehradrige PVC Kunststoffkabel vom Typ NYY verwendet.

Bei größerer mechanischer Belastung und im Unterwasserbereich sollten mittelschwere Gummischlauchleitungen vom Typ H07RN-F zum Einsatz kommen.

Ein besonderes Problem kann im Bereich von Anoden, an denen kein Wasseraustausch stattfindet, oder im Schlack auftreten. Durch die chemischen Reaktionen an den Anoden konzentriert sich das umgebende Medium stark auf, was eine Übersäuerung des Mediums und auch Chlorgasbildung zur Folge haben kann. In solchen Fällen ist es empfehlenswert, ein säure- und chlorgasbeständiges PVDF Kabel zu verwenden.

### 11.3.13 Länge und Querschnitt der Kabel

Die Nennspannung der kathodischen Korrosionsschutzanlage definiert sich im Wesentlichen aus der benötigten Anodenspannung, der Polarisationsgegenspannung und dem Spannungsabfällen in den Leitungen zwischen Schutzstromgerät und den Anoden- und Kathodenanschlüssen.

Dabei ist der Spannungsabfall abhängig von der Länge und des Querschnitts der Kabel und aufgrund von relativ großen Strömen in der Größenordnung von bis zu einigen 100A nicht zu vernachlässigen.

Dabei gilt folgende Formel zur Berechnung des Spannungsabfalls:

$$U_L = \rho \cdot \frac{L}{A} \text{ [V]} \quad \text{Gl. 11.14)}$$

$U_L$  = Spannungsabfall des Kabels in [V]

$\rho$  = Spezifischer Widerstand, bei Kupfer  $0,017 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$

$L$  = Kabellänge in [m]

$A$  = Kabelquerschnitt in [ $\text{mm}^2$ ]

#### **11.3.14 Klemm- und Verteilerkästen**

Auf Klemm- und Verteilerkästen sollte, wenn dafür nicht trockene und überflutungssichere Räume zur Verfügung stehen, verzichtet werden. Stattdessen sollten nur hochwertige Gießharzmuffen verwendet werden. Klemm- und Verteilerkästen sollten robust und korrosionsbeständig sein.

Bei einem Einsatz von Klemm- oder Verteilerkästen ist jedoch darauf zu achten, dass der Typ der Kästen den Anforderungen an Dichtigkeit und Korrosionsbeständigkeit (hohe Chloridkonzentration auch in der Atmosphäre!) genügt.

## 12. Schutz von Binnenwasserbauwerken

### 12.1 Allgemeine Grundsätze

Stahlwasserbauten an Binnenwasserstraßen werden in erster Linie mit Beschichtungen vor Korrosion geschützt.

Diese verlieren teilweise ihre Funktion durch

- mechanische Einwirkungen, z. B. durch Grundberührungen von Schiffen in Kanalbrücken und Hebewerken oder durch Eis und Treibgut an Verschlüssen,
- verdeckte Mängel bei der Oberflächenvorbereitung und Applikation,
- Alterung der Beschichtung

Beim Einsatz von nicht untereinander isolierten Mischkonstruktionen aus unlegiertem Baustahl und nichtrostendem Stahl an Dichtungen, Hydraulikleitungen, Luftsprudelanlagen kommt es zur Kontaktkorrosion. Dies gilt gleichermaßen an Verbindungen von Baustahl mit Stahl im Beton.

Die Nutzungsdauer der Bauwerke wird mit passiven Schutzmaßnahmen nicht erreicht. Eine Kombination mit KKS-Anlagen ist zunehmend erforderlich. Damit werden erreicht:

- Verlängerung der Instandhaltungsintervalle,
- Senkung der Sperrzeiten von Schleusen und Hebewerken sowie Umfahrungen infolge Sperrungen von Kanalbrücken,
- Verringerung der Umweltbeeinflussung durch Verminderung von Strahl- und Beschichtungsarbeiten,
- deutliche Senkung der Instandhaltungskosten.

Die Anforderungen für die Planung und Errichtung von KKS-Anlagen für feste und bewegliche Teile von Stahlwasserbauten sowie für stählerne Ausrüstungsteile von Wasserbauwerken sind analog denen von Meerwasserbauwerken.

- Das Schutzobjekt muss eine durchgehende metallene Leitfähigkeit haben,
- zu Anlagen und Bauwerksteilen mit niederohmigen Ausbreitungswiderständen dürfen keine metallischen Kontakte sein,
- der passive Schutz muss verträglich mit dem kathodischen Schutz sein und einen ausreichenden Isolationswiderstand haben.

Die Erstellung erforderlicher Unterlagen wie

- Machbarkeitsstudien,
- Bautechnische Anforderungen,
- Voruntersuchungen (Wasseranalyse, Potentiale, ...),
- Berechnungsunterlagen und Auslegung der KKS Anlagen

müssen von erfahrenen Fachfirmen bzw. Ingenieurbüros ausgeführt werden.

Abhängig von den jeweils örtlichen Verhältnissen sind an stählernen Binnenwasserbauwerken sowohl Fremdstromanlagen als auch galvanische Schutzanlagen mit Magnesium wirtschaftlich einzusetzen.

Ist bei Neubauten absehbar das KKS-Anlagen erforderlich werden, sind zumindest die bauseitigen Voraussetzungen zu schaffen. Sinnvoll erscheint bei Fremdstromanlagen die komplette Installation von Betriebsbeginn an.

Schutzstromgeräte, Fremdstromanoden, Mess- und Steuerelektroden sowie Ausrüstungen, wie Kabel, Leitungen, Schutzkörbe u. a., sind weitgehend analog denen von Seewasserbauwerken.

Um die Ansprüche an Bedienung und Betreuung gering zu halten, sollte die Ausrüstung komfortabel sein.

Da die Fehlstellenrate bei der Inbetriebnahme deutlich geringer ist als bei fortschreitendem Betrieb, wird die erforderliche Stromdichte deutlich geringer sein. Um überhaupt Messwerte von den Geräten ablesen zu können, sind entsprechende Shunts zu verwenden.

Schutzmaßnahmen gegen elektrischen Schlag sind nach DIN VDE 0100-410 [1] auszuführen. Sie sind so zu wählen, dass die Korrosionsschutzanlage wirksam bleibt und die Funktion der Schutzmaßnahmen nicht beeinträchtigt wird.

Kathodisch geschützte Anlagenteile werden grundsätzlich nicht an den Potentialausgleich angeschlossen. Ist ein Anschluss erforderlich, so sind diese Verbindungen ausschließlich über Trennfunkstrecken herzustellen.

Die in Tabelle 12.1 aufgelisteten Potential-Kriterien sind an Binnenwasserwerken einzuhalten.

	<b>mV/Cu</b>	<b>mV/Ag</b>	<b>mV/Zu</b>
Schutzpotential	- 85	- 730	+ 230
Grenzpotential	- 1050	- 930	+ 36

**Tab. 12.1:** Potential-Kriterien

Bei Anodenbefestigungen direkt am Bauwerk ist ein Schutzschild zur Vermeidung von Beschichtungsschäden infolge zu negativen Potentials in Anodennähe anzubringen. Am Rande des Schutzschildes sollte das Potential nicht negativer als  $-1050 \text{ V/Cu}$  liegen. Die Berechnung hat nach folgenden Formeln zu erfolgen.

Punktförmige Anode

$$r = \frac{I \cdot S}{\Delta u \cdot 2 \pi} \quad \text{in cm} \quad \text{Gl. 12.1)}$$

Rechteckige Anode (elliptisches Schutzschild)

$$\frac{a + 2b}{6} = r = \frac{I \cdot S}{\Delta u \cdot 2 \pi} \quad \text{in cm} \quad \text{Gl. 12.2)}$$

Der Quotient  $a/b$  ist durch das Verhältnis von Anodenlänge zu Anodenbreite gegeben.

Die Formelzeichen haben folgende Bedeutung:

- $r$  = Radius des Schutzschildes in cm
- $I$  = Stromaustritt an der Anode in A
- $S$  = Spezifischer elektrischer Widerstand in  $\text{Ohm} \cdot \text{cm}$
- $\Delta u$  = Potentialdifferenz am Schutzschildsand zwischen freiem Korrosionspotential und  $U = 1050 \text{ mV/Cu}$ ; für unlegierten Stahl in Binnenwässern ca.  $500 \text{ mV/Cu}$
- $a$  = Länge des Schutzschildes in cm
- $b$  = Breite des Schutzschildes in cm

Die Schutzschilde sind aus glasfaserverstärkten Kunststofflaminaten, Kunststoffmassen oder kathodenschutzverträglichen Beschichtungen ausreichender Schichtstärke ( $\geq 1\text{-}3 \text{ mm}$ ) herzustellen.

Auf eine gute Oberflächenvorbereitung und sachgerechte Ausführung ist besonders zu achten.

Die Absicherung der Anoden hat so zu erfolgen, dass bei Kurzschluss keine Beschädigung der Beschichtung erfolgen kann.

Als Mess- und Steuerelektroden zur Messung des Schutzpotentials und Steuerung von Fremdstromschutzanlagen sind vorzugsweise robuste Zink-Elektroden zu verwenden, die in halbjährlichen Abständen mechanisch bzw. elektrisch zu reinigen sind.

Durch Einbau entsprechender Leiterkarten sind die Geräteanzeigen in  $\mu\text{mV/Cu}$  auszuführen.

## 12.2 Schleusentore, Schütze

Schleusentore und Sparbecken- oder Längskanalverschlüsse werden passiv vor Korrosion geschützt. Überdurchschnittlicher, nicht passiv geschützter Edelstahl von Dichtschleifflächen, Rollen, Achsen, Klemmleisten, Luftsprudelanlagen, Verbindungsmittel u. a. initiieren auf Grund des hohen Sauerstoffangebotes selbst in Wässern niedriger Leitfähigkeit hohe Korrosionsabträge an Fehlstellen der passiven Beschichtung des unlegierten Baustahls.

Die Berücksichtigung des kathodischen Korrosionsschutzes ist nach Feststehen der Materialpaarungen dringend angeraten.

Voruntersuchungen sind unumgänglich, wenn nicht Erfahrungen von bauartgleichen Verschlussystemen vorliegen. Klapp-, Hub-, Stau-, Segmenttore, Hub- und Zylinderschutz u. a. verlangen individuelle Lösungen. Dies gilt besonders für Tore mit innenliegenden Schützen, wo die Edelstahldichtflächen direkt mit dem unlegierten Baustahl verschweißt sind.

Zum Schutz weitgehend glatter Flächen bieten sich Fremdstromanoden, isoliert angebracht im Betonkörper seitlich der Schleusentore, an. Bei leitender Verbindung mit dem Stahl im Beton ist ein Schutzstrom von 5 mA/m<sup>2</sup> anzusetzen.

Bei Spundwandschleusen ist der Torisolierung und Anodenanordnung besondere Beachtung zu schenken. Bei Nichtisolierung kann der unkontrolliert abfließende Strom an nicht passiv geschützten Spundwänden den eigentlichen Schutzstrom für das Tor deutlich übersteigen. Die Leistungsgrenze des Schutzstromgeräts wird schnell erreicht und überschritten.

Sind die Torrückseiten kassettenförmig ausgebildet, so ist der kathodische Schutz abhängig von der Tiefe der Riegel (Faradayscher Käfig) häufig nur mit zusätzlichen galvanischen Anoden zu erreichen. Das Gewicht ist zu kontrollieren, hat aber in der Regel keinen Einfluss auf den Schleusenbetrieb.

Schleusenammern sind über Nacht oder bei langer Betriebspause immer auf Oberwasser zu stellen, um die Funktion zu gewährleisten.

Beeinflussungen fremder Installationen sind nachzuweisen, die jeweils zulässigen Werte einzuhalten.

Bei nachträglichem Einbau der Anodennischen sind die Nischen den ausgewählten Anoden anzupassen. Im Neubau kann die Betonbewehrung den erforderlichen Nischen angepasst werden. Es können weniger zu belastende kompaktere Anoden aus Eisen-Silizium eingesetzt werden.

Speziell bei der Nachrüstung von KKS-Anlagen an Schleusen ist dem Schutz der Kabel und Leitungen besondere Beachtung beizumessen. Auch Kabelschutzrohre sollten aus Kunststoffen sein bzw. passiv beschichtet sein. Für Schutzkörbe von Messsonden darf auf keinen Fall zusätzlich Edelstahl eingesetzt werden.

### 12.3 Wehre

Wehre aus unlegiertem Stahl sind in der Regel, abhängig von der Konstruktion (Fischbauklappen, Walzenwehr, Doppelschütz o.a.), sowohl außen als auch innen der Korrosionsgefahr ausgesetzt, da die Dichtflächen zumeist aus nichtrostenden Stählen bestehen.

Der Außenschutz der passiv geschützten Wehre kann mittels Fremdstrom oder auch mit galvanischen Anoden erfolgen. Abhängig von der Breite des Wehrkörpers und der Leitfähigkeit des Wassers wurden gute Erfahrungen mit einer aufgeständerten Anordnung der Fremdstromanoden vor dem Wehrkörper gemacht. Dabei wird auch ein guter Schutz im Scharnierbereich (Edelstahlbolzen) erreicht.

Zum Schutz der Innenflächen sind die in Binnenwässern üblichen Magnesiumanoden nicht zugelassen. Bei Absturz der Anoden kann Funkenreißen Faulgase zünden. In geschlossenen Tanks ist auch die Wasserstoffentwicklung bei der Reaktion des Magnesiums zu beachten.



Deshalb kommen Zinkanoden zum Einsatz, wengleich angesichts der geringen Triebspannung von 0,2 – 0,3 V (Mg 0,6 V) gegenüber geschütztem Stahl eine große Anodenanzahl und -masse erforderlich sind. Die Anoden sollten angeschweißt sein, um im Hinblick auf den Langzeitschutz eine widerstandsarme Verbindung zu gewährleisten.

### 12.4 Kanalbrücken, Hebewerkströge

Für Innenflächen passiv geschützter Kanalbrücken sind als aktive Schutzverfahren Fremdstrom und galvanische Anoden gleichermaßen geeignet. Wegen der hohen mechanischen Belastung der Beschichtung im Boden und ca. 1000 mm im Seitenbereich ist die Beschichtung besonders abriebfest auszuführen. Die Installation der Anoden sollte zweckmäßigerweise geschützt hinter dem Leitwerk im Seitenbereich erfolgen.

Im Hinblick auf eine gleichmäßige Stromverteilung sind Anodenhaltungen in ca. 300 cm Abstand vom Bauwerk anzubringen. Werden Anoden oder Messelektroden direkt am Stahlwasserbauwerk befestigt, sollte die Kabeldurchführung mit wasserdichten Stollbuchsen durch einen Kofferdammkasten erfolgen.

Zur Vermeidung von Überpotentialen sind auch galvanische Anoden bei neuen Beschichtungen regelbar zu gestalten. Erreichen sie später in Brückenmitte auf Grund von Beschichtungsschäden keinen ausreichenden Schutz, ist keine wirtschaftliche Abwägung im Hinblick auf eine Erhöhung der Anodenmasse oder die Umstellung auf eine Fremdanlage erforderlich, wenn die Beschichtung nicht instand gesetzt werden kann.

## **12.5 Sonstige Bauwerke**

An Schwimmerhebwerken hat sich für die Schwimmer der Fremdstromschutz mit Anodenketten (Fe/Si) und auch mit Drahtanoden (Mo/Ti) bewährt. Eine gleichmäßige Schutzstromverteilung bis in eine Tiefe von 60 Metern ist sowohl an den Schwimmbehältern als auch an den Tübbings zu erzielen. Drahtanoden und Einspeisekabel sind in Kunststoffschutzkörben zu führen.

### **Literatur:**

- [1] DIN VDE 0100: Bestimmungen für das Errichten von Starkstromanlagen mit Nennspannungen bis 1000 V

## **13. Sondermaßnahmen**

### **13.1 Streustrombeeinflussungen**

#### **13.1.1 Externe Streuströme**

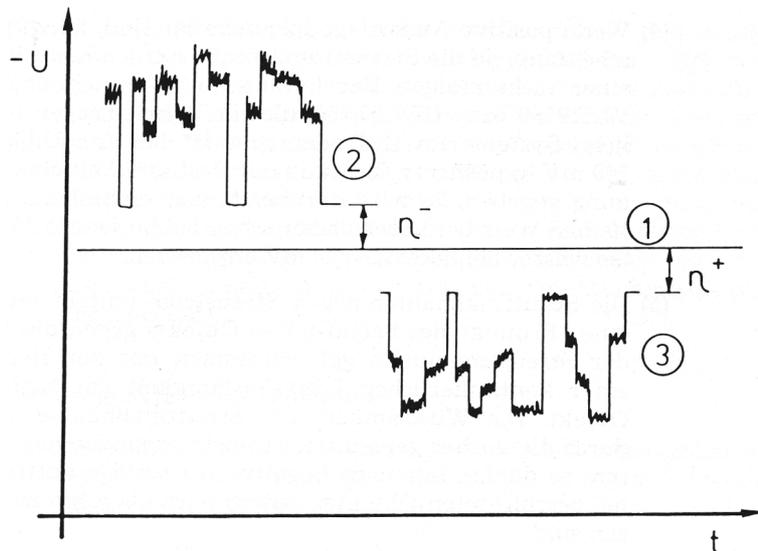
##### **13.1.1.1 Nachweis externer Streuströme**

Externe Streuströme stammen größtenteils aus benachbarten kathodischen Schutzanlagen oder aus Gleichstrom-Schweißanlagen, Gleichstrom-Bahnen o. ä.

Im ersten Falle ist die Streustromquelle von vornherein bekannt; sie kann zur Messung getaktet werden. Im zweiten Falle ist die Streustromquelle häufig unbekannt. Hier hilft aber, dass die Streuströme bei Registrierung ein typisches Kurvenbild aufweisen (Schweißstromkurven, Arbeitstakt von Kränen, Fahrstrom von Bahnen, Hochspannungsgleichstromanlagen, Windkraft, usw.), was einen direkten Schluss auf den Verursacher ermöglicht (s. Abb. 13.1).

Bei Verdacht auf Streustromkorrosion in Nachbarschaft zu kathodischen Schutzanlagen wird die Schutzanlage durch eine Intervall-Schalteinrichtung periodisch ein- und ausgeschaltet (getaktet), z. B. 10 sek. „ein“ und 5 sek. „aus“, und am beeinflussten Objekt am besten mit einem Analogmessgerät Potentialmessungen ausgeführt. Zeigen diese Messungen, dass sich die Potentiale im gleichen Rhythmus sprunghaft ändern, ist eine Streustrombeeinflussung nachgewiesen. Bei positiven Ausschlägen im „Ein“-Zustand ist Stromaustritt lokalisiert, bei negativem Stromeintritt.

Falls in Nachbarschaft von Schutzanlagen nur negative Ausschläge gefunden werden sollten, ist eine Gefährdung durch die vorhandenen Streuströme nicht gegeben. In diesem Falle fließt der Streustrom über zufällig vorhandene metallische Leiter oder ein Erdungs-/Nulleitersystem der Elektroinstallation in unschädlicher Form zur Streustromquelle zurück. Irgendwelche Eingriffe in das Streustromsystem sind nicht erforderlich.



**Abb. 13.1:** Potentialdiagramm bei Schweißstrombeeinflussung

Erläuterungen zur Abb. 13.1:

Kurve 1: Arbeitspause im Schweißbetrieb

Kurve 2: Stromeintritt im Arbeitsrhythmus

Kurve 3: Stromaustritt im Arbeitsrhythmus

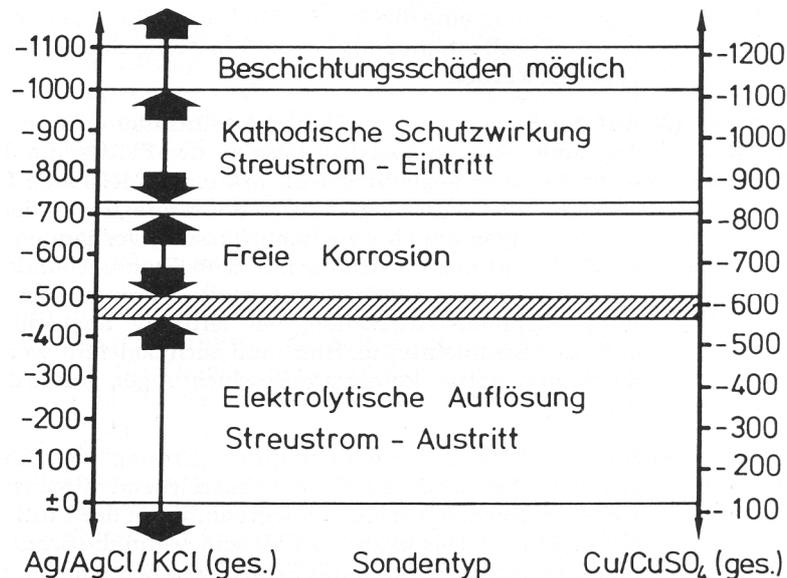
Wenn aus der Kurvenform oder der Kenntnis über die in Frage kommenden Streustromverursacher nicht direkt auf die Quelle geschlossen werden kann, sind Langzeitregistrierungen über mindestens 24 h erforderlich. Aus dem Vergleich des Diagramms mit Arbeitspausen oder Betriebszeiten lässt sich meist auf den Verursacher schließen. Anderenfalls müssen alle in Frage kommenden Gleichstromquellen im Umkreis ermittelt und bei laufender Registrierung systematisch und ggf. mit kodiertem Rhythmus getaktet werden. Hinweise auf die Bewertung von Potentialen sind in Abb. 13.2 gegeben.

### 13.1.1.2 Gegenmaßnahmen zu externen Streuströmen

Die Gegenmaßnahmen bei dieser Art der Streustrombeeinflussung bestehen in der Regel darin, dass Defekte an der Verkabelung und/oder am Erdungssystem des Verursachers repariert werden müssen (z. B. Doppelerdschlüsse). Das bedeutet nicht mehr, als dass die einschlägigen VDE-Bestimmungen einzuhalten sind. Am beeinflussten Objekt sind keine Maßnahmen erforderlich, allenfalls Überwachungsmaßnahmen.

Speziell wenn Streuströme von Schweißanlagen ausgehen, kann es möglich sein, dass die Streuströme selbst nicht zu beseitigen sind, ohne die Schweißanlage komplett verwerfen zu müssen. Das ist z. B. der Fall, wenn aus einer Großanlage an Land die Schweißstellen auf (mehreren) Schiffen versorgt werden. Hier treten auch zwischen den Schiffen und zwischen Schiffen und Ausrüstungskai unvermeidbare Ausgleichsströme auf. Schutzmaßnahmen sind nur möglich über spezielle, potentialgesteuerte Schutzanlagen mit schneller Charakteristik (s. Abschnitt 2.4.2 Schutzstromgeräte), die das Potential an den gefährdeten Objekten konstant und im unschädlichen Bereich halten. In Einzelfällen ist es möglich, dass auch diese Gegenmaßnahmen nicht greifen. Dann bleibt nur noch die

Wahl, auf den Stand der Technik umzurüsten: Dezentralisierte Schweißstromversorgung in kleinen Einheiten, z. B. auf dem Schiff.



**Abb. 13.2:** Bewertung der Potentiale

Auch in diesem Bereich der Streustromquellen gilt: Wo kein Streustrom aus Gleichstrom-Quellen nachgewiesen werden kann in Form der typischen Potentialregistrierungen und -kurvenformen, ist kein Streustrom als Korrosionsursache vorhanden. Oder: Wenn die Ausschläge am Schreiber nur in negativer Richtung erfolgen und positive Ausschläge nirgends nachweisbar sind, trifft eine Gefährdung der beeinflussten Objekte nicht zu. Hier ist dann die Streustromquelle selbst gefährdet (Ausnahme: zu stark kathodisch beeinflusste beschichtete Objekte).

### 13.1.2 Interne Streuströme

#### 13.1.2.1 Nachweis interner Streuströme

Interne Streuströme spielen heute im Bereich von Hafenanlagen eine größere Rolle als externe. Sie treten innerhalb eines geschützten Objekts auf. Regelmäßig anliegende Schiffe sind in diesem Sinne hinzuzurechnen. Die Messung der oder die Prüfung auf Streuströme kann nach der vorher beschriebenen Methode durch Potentialmessungen erfolgen oder durch Messung von Potential- bzw. Spannungsunterschieden.

Da auch hier wegen der regulären Unterschiede in der Potentialverteilung eine direkte Beurteilung anhand der Potentiale nicht möglich ist, muss als erster Schritt die Streustromquelle getaktet werden.

Auf der Suche nach schädlichen Beeinflussungen an den anliegenden Schiffen werden diese an der Fläche, die dem geschützten Pier gegenüberliegt, mit einer Messsonde flächendeckend überprüft. Die Einschaltausschläge auf den Messgeräten zeigen an, ob eine Beeinflussung vorhanden ist. Bei Schiffen, die nicht leitfähig mit dem Pier verbunden sind, existieren neben Stromeintrittsstellen immer

auch gleichzeitig Stromaustrittsstellen, bei leitfähig angeschlossenen u. U. nur Stromeintritte. Hier muss auch beurteilt werden, ob durch zu negative Potentiale Beschichtungen gefährdet werden.

### **13.1.2.2 Gegenmaßnahmen zu internen Streuströmen**

Stromaustrittsstellen können durch „Erdung“ des Schiffs gegen den Pier z. B. durch eine ausreichend dimensionierte Kabelverbindung verhindert werden, wenn der Einfluss nicht übermäßig ist. Das kann der Fall sein, wenn die Schutzanlage falsch konzipiert ist und das Schiff zwischen Anoden und geschütztem Pier, über den Anoden oder auch nur zu nahe an den Anoden liegt.

Wenn die „Erdung“ der Schiffe zur Ableitung der Streuströme nicht ausreicht, muss die Schutzanlage konstruktiv geändert werden, z. B. durch die Verlagerung von Grundanoden (Hafensohle) an die Spundbohlen oder Rohrpfähle des Piers. Grundprinzip ist die Verkleinerung des Abstands Anode/Kathode.

Alle genannten Gegenmaßnahmen müssen messtechnisch durch Ein-/ Ausschaltpotentialmessungen nachgeprüft werden.

Beeinflussungen Pier/Schiff können durch schiffseigene Schutzanlagen kompensiert oder abgemindert werden. In den Fällen stärkerer Beeinflussung ist das wegen des typischen Aufbaus der schiffseigenen Schutzanlagen, die eine Quersymmetrie Bug/Heck aufweisen, jedoch ohne gravierende Nachteile nicht möglich: bei Kompensierung auf der einen Seite des Schiffs kann auf der anderen Über- oder Unterschut aufzutreten. Eine Schutzanlage mit Längssymmetrie Steuerbord/Backbord würde diese Nachteile vermeiden.

Beeinflussungen vom Schiff zum Pier sind in der Mehrzahl der Fälle recht unwahrscheinlich, da ein Missverhältnis zwischen der Leistungsfähigkeit einer kathodischen Schiffs- und einer Pieranlage mindestens im Verhältnis 1:10 besteht. Beeinflussungen sind nur denkbar zwischen geschützten Schiffen, die bei extrem schlechter Beschichtung hohe Schutzströme fahren, und hervorragend bis tief unter Hafensohle beschichteten Piers mit extrem niedrigen Schutzströmen, wenn besondere, erschwerende Bedingungen hinzukommen, wie z. B. geringer Abstand Schiff/Pier. Bei Nachweis bedeutsamer Streustromwirkungen können Pier und Schiff verbunden oder der Schutz des Schiffes abgeschaltet werden.

Interne Streuströme können aber auch zur Gefährdung von Bauteilen führen, die zum Schutzobjekt selbst gehören. Das gilt für Dalben, Fenderpfähle und Steigeleitern, aber auch u. U. für einzelne Bohlen oder die Bereiche um Dehnungsfugen.

Derartige Beeinflussungen lassen sich in der Regel nicht zuverlässig durch Potentialmessungen aufdecken, da nur ein Mittelwert aus abweichenden Streustrom-Potentialverschiebungen und regulären Potentialen erfasst wird. In diesem Falle wird der Schutzstrom ebenfalls getaktet und der Spannungsunterschied zwischen Schutzobjekt und mutmaßlich beeinflusstem Objekt gemessen. Bei elektrischer Durchverbindung zur Kathode (was schädliche Beeinflussungen ausschließt) geht die Spannungsdifferenz gegen Null oder beträgt höchstens einige Millivolt (mV) durch den Spannungsfall in der metallischen Verbindung. Im Fehlerfall treten im Takt „Strom ein“ Spannungsdifferenzen in der Größenordnung von 100 mV auf, wobei das beeinflusste Objekt positiv ist.

Dabei tritt Strom anodennah ein und an der kathodennächsten Stelle wieder aus. Es kann möglich sein, dass diese Stelle mit einer Messsonde nicht erreichbar ist, d. h. der Nachweis nicht durch die sonst zum Streustromnachweis so erfolgreiche Potentialmessung erbracht werden kann. Das wäre der Fall, wenn z. B. der kathodennächste Punkt im Boden liegt (Kreuzung Dalben/Schrägpfahl).

Werden ähnliche Fehler im Bereich der Spundwandschlösser vermutet, muss die Spannungsdifferenz am Schloss von Bohle zu Bohle gemessen werden, vorzugsweise bei getakteter Schutzanlage.

Abhilfe stellt die Schaffung oder Sicherstellung einer gut metallisch leitenden Verbindung zwischen allen Teilen eines geschützten Bauwerks dar. Dalben, Fender usw. können über Kabel angeschlossen werden; Steigeleitern, Bohlenschlösser und ähnliches werden durch Schweißnähte oder -punkte überbrückt.

Einen schwierigen Fall kann unter ungünstigen Umständen Stahlbeton darstellen, wenn er im Einflussbereich einer kathodischen Schutzanlage liegt. Dann besteht die Möglichkeit, dass Streuströme in die Bewehrung eintreten und an den Austrittsstellen Schäden verursachen. Zur Messung müssen Bewehrungsstränge freigelegt werden, wenn Verdacht auf Streustromeinflüsse besteht. Gemessen wird nach der Potential- und/oder Spannungsdifferenz-Methode.

Gegenmaßnahmen sind nachträglich in der Form von Streustromableitungen kaum mehr möglich. Der einzig denkbare Schutz besteht darin, die Betonflächen gegen den Elektrolyten elektrisch zu isolieren, z. B. durch wasserdichte Beschichtungen, Folien oder Bandagen. Nachträgliche Beschichtungen sind nur in der Wasserwechselzone möglich, während Folien und Bandagen sich auch unter Wasser applizieren lassen.

Bei der Planung eines Bauwerks, für das der vorher geschilderte Fall zutrifft, ist eine derartige Streustrombeeinflussung der Beton-Bewehrung zu berücksichtigen. Das geschieht dadurch, dass mindestens die äußeren Lagen der Bewehrung, die dem Elektrolyten zugewandt sind, durch Verschweißungen lückenlos miteinander und mit der Kathode verbunden werden. Die Bewehrung wird damit in das kathodische Schutzsystem einbezogen. Nachteile sind nicht zu erwarten.

### **13.2 Explosionsgefährdete Bereiche**

Bei Anlagen im explosionsgefährdeten Bereich sind alle einschlägigen Vorschriften, insbesondere DIN VDE 0165 [1] einzuhalten. Daraus folgt, dass Schutzstromgeräte in explosionsgeschützter Ausführung - Euronorm EExd II; DIN EN 50014 [2] bzw. vorher Exd3nGS, VDE 0170/0171 - installiert werden müssen. Dies ist nur bei Geräten mit kleinen Leistungen durchführbar. Größere Geräte sind außerhalb des Ex-Bereichs aufzustellen. Längere Leitungen mit erhöhten Querschnitten und Spannungsfällen müssen in diesem Falle in Kauf genommen werden.

#### **Literatur:**

[1] DIN VDE 0165: Errichtung elektrischer Anlagen in explosionsgefährdeten Bereichen

[2] DIN EN 50014: Elektrische Betriebsmittel für explosionsgefährdete Bereiche

## 14. Wartung, Überwachung und Steuerung

### 14.1 Wartung

Der Zweck einer kathodischen Korrosionsschutzanlage wird nur durch eine ordnungsgemäß funktionierende und eingestellte Anlage erreicht. Ausfallzeiten oder außerordentliche Betriebszustände sind möglichst zu minimieren. Dazu ist es erforderlich, dass die Anlage von Fachpersonal oder von eingewiesenem Betriebspersonal regelmäßig überwacht wird.

Die Erfahrung hat jedoch gezeigt, dass Betriebspersonal den kathodischen Korrosionsschutz nicht immer mit der notwendigen Ernsthaftigkeit betrachtet. Teilweise aus Mangel an Fachkenntnis oder auch aus Zeitgründen wurden wichtige Kriterien für die Funktion der Anlagen nicht überprüft oder ignoriert. Dies kann dazu führen, dass die Schutzwirkung der Anlage über einen längeren Zeitraum durch den Ausfall eines Teiles oder der ganzen Anlage nicht gegeben ist oder dass Fehleinstellungen zu einem nicht ausreichenden Schutz oder auch zu einem zu negativen Schutzpotential (Überschutz) des Bauwerkes führen. Letzteres kann zu einer Beschädigung der Beschichtung durch eine kathodische Unterwanderung der Beschichtung an schon beschädigten Stellen oder Blasenbildung der Beschichtung führen.

Die Intensität der personellen Überwachung ist im Wesentlichen von dem installierten Überwachungssystem abhängig.

- Wenn keine Fernüberwachung installiert ist (dies ist häufig bei kleineren Anlagen der Fall) ist eine wöchentliche Funktionskontrolle der Schutzanlagen empfehlenswert. Hierbei sind nur die Werte an den Schutzanlagen wie Strom, Spannung und Potential aufzunehmen und zu dokumentieren. Bei größeren Abweichungen sind die Ursachen zu erkunden und zu beheben. Einmal jährlich sollten die Korrosionsschutzanlagen komplett überprüft werden, d.h. die Aufnahme aller Werte wie sie bei der Inbetriebnahme und Abnahme aufgenommen wurden. Bei Bedarf ist eine Neueinstellung vorzunehmen.
- Bei fernüberwachten Anlagen kann auf die wöchentliche Funktionskontrolle verzichtet werden. Jedoch sollte das System auch hierbei einmal jährlich komplett überprüft und eingestellt werden.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die Schutzwirkung von Korrosionsschutzanlagen nur sichergestellt ist, wenn sie auch zuverlässig betrieben und überwacht werden. Nur dann erfüllt die Investition für die Installation des kathodischen Korrosionsschutzes ihren Zweck.

## **14.2 Überwachung und Steuerung**

Neue kathodische Korrosionsschutzanlagen für den Stahlwasserbau werden bei großen Anlagen überwiegend als Fremdstromanlagen konzipiert und gebaut. Diese Anlagen bedürfen einer regelmäßigen Kontrolle und Einstellung der Geräte durch fachlich geschultes Personal bzw. einen Korrosionsschutzfachmann.

Es ist daher heutzutage Stand der Technik mittlere und größere kathodische Korrosionsschutzanlagen durch elektronische Mess-, Überwachungs- und Steuerungssysteme zu ergänzen, um den personellen Wartungs- und Überwachungsaufwand zu minimieren. Diese Systeme werden daher meistens auf ein oder mehrere zentrale Überwachungsrechner geschaltet um alle relevanten Werte und Parameter zentral überwachen und einstellen zu können.

Zudem lässt sich die Überwachungsanlage über Datenkommunikationsdienste, wie z.B. Telefonleitung GSM, auch mit weit entfernten Rechnern zur Überwachung und Steuerung verbinden. Dadurch ergibt sich die Möglichkeit einer Fernüberwachung und Fernsteuerung durch externe Korrosionsschutzfachfirmen auch ohne sonst notwendige zeitaufwändige Anreise.

### **14.2.1 Komponenten einer Fernüberwachungs- und Steuerungsanlage**

Für die Datenübertragung der Mess- und Steuersignale für Stahlwasserbauwerke wie z.B. Hafenanlagen kommen zumeist so genannte Bussysteme zur Anwendung, wie z.B. Profibus, Interbus-S oder Modbus. Die angeschlossenen Module lassen sich über Kupferkabel im Strang miteinander verbinden (RS485 Datenübertragung). Dies hat den Vorteil, dass bei lang ausgedehnten Anlagen der Verkabelungsaufwand und -kosten geringer sind, als bei einer Sternverkabelung, wo jedes Modul über ein separates Kabel mit dem zentralen Rechner verbunden wird.

Mehrere Schutzstromgeräte können dabei über Bussysteme kostengünstig miteinander vernetzt werden. Die Messdaten und Steuerbefehle werden dabei digital mit Übertragungsraten bis zu 12Mbit/sek. übertragen. Dabei kann die Länge eines solchen Netzwerkes mehrere Kilometer betragen. Eine solche Anlage besteht zumeist aus folgenden Komponenten:

1. Zentraler Rechner mit Kommunikationsprozessor und Modem
2. Analoge Messmodule
3. Digitale Eingangsmodule
4. Digitale Ausgangsmodule
5. Analoge Ausgangsmodule zur Steuerung von elektronischen Gleichrichtern
6. Anschaltbaugruppen zur Datenübertragung
7. Datenübertragungskabel

## 1. Zentraler Rechner

Der Rechner ist zumeist ein für industrielle Anwendungen und Dauerbetrieb ausgelegter PC, möglichst mit redundanter Festplatte zur Spiegelung (Datenerhalt, selbst bei Beschädigung einer Festplatte), Backupsystem zur Langzeitarchivierung, Drucker zur Störmeldungsausgabe und Messprotokollausgabe.

Der Rechner sollte von der Leistung und Speicherausrüstung für die Anlagengröße ausreichend groß ausgelegt werden (Reserven für Erweiterungen sind mit einzurechnen).

## 2. Messmodule

Diese dienen der Aufnahme von analogen Messwerten wie Ausgangsströme und Ausgangsspannungen bei Gleichrichtern oder Referenzelektrodenwerten bei Potentialmessungen. Dabei werden die Messmodule je nach geforderten Messarten und Bereichen gewählt. Für spezielle Messaufgaben können auch spezielle Messwertumformer vor die Messmodule geschaltet werden.

## 3. Digitale Eingangsmodule

Diese dienen des Auslesens von diskreten Zuständen, wie z.B. Stör- oder Betriebsmeldungen von Gleichrichter (Motorschutzschalter, Endschalter, Wahlschalter...).

## 4. Digitale Ausgangsmodule

Diese dienen zum Steuern von Schützen zum Abschalten des Ausgangsstromes (Takten) oder auch zum Betätigen von motorbetriebenen Stelltransformatoren.

## 5. Analoge Ausgangsmodule

Diese dienen zum Steuern der Ausgangsspannung von elektronisch geregelten Gleichrichtern mit Hilfe eines analogen Spannungs- oder Stromsignals.

## 6. Anschaltbaugruppen

Diese dienen zur Kopplung der o.g. Module mit dem Datenübertragungskabel mit deren Hilfe die Daten und Befehle zum/vom zentralen Rechner übertragen werden.

## 7. Datenkabel

Das Datenkabel besteht je nach Bustyp aus einem zwei- oder mehradrigen geschirmten Kabel für Erdverlegung oder für Kabelkanal-/Kabelschutzrohrverlegung.

Das Kabel wird in der Bustopologie von einer Anschaltbaugruppe zur nächsten Anschaltbaugruppe verlegt. Der zentrale Rechner kann dabei an jeder Stelle des Stranges platziert werden. Pro Anschaltung oder Rechner werden zwei Kabelenden mit einem speziellen Anschluss-Stecker verbunden und dieser mit der Anschaltbaugruppe/ dem Rechner verbunden.

Die jeweils erste und letzte Anschaltbaugruppe wird mit nur einem Kabel verbunden.

## 14.2.2 Vorteile einer Fernsteuerung

in solches System vereinigt mehrere Vorteile:

- Das System wird ständig überwacht, d.h. eine Störung des Systems oder eines Teilsystems wird umgehend gemeldet und protokolliert. Ein unbemerkter Ausfall und eine damit einhergehende Depolarisation des entsprechenden Schutzobjektes oder -bereiches wird weitgehend vermieden.
- Eine regelmäßige Überwachung der Funktionsfähigkeit der Anlage durch einen Korrosionsschutzfachmann ist nicht mehr notwendig. Im Normalfall wird eine Überprüfung nur noch im gemeldeten Störfall notwendig und nach entsprechend längeren Überprüfungsintervallen.
- Die Messwerte der Anlage können mitgeschrieben und protokolliert werden, um auch schleichende Zustandsänderungen, wie z.B. Anodenabnutzung, Abdriften der Elektroden oder Zustandsänderungen der Schutzobjekte verfolgen zu können.
- Durch die Möglichkeit der Fernanbindung der Steuer- /Überwachungsanlage über Telefonleitung, GSM (Handy) oder auch Internet, bietet sich zudem die Möglichkeit der Ferndiagnostik über einen Korrosionsschutzfachmann vom Büro aus.
- Zentrale Möglichkeit der Parametervorellung sämtlicher, auch kilometerweit auseinanderliegender Schutzanlagen über den Zentralrechner. Dabei können auch alle angeschlossenen Gleichrichter zentral und synchron getaktet werden, um unbeeinflusste Ausschaltpotentiale messen zu können. Ein aufwendiges manuelles Synchronisieren sämtlicher Schutzstromgeräte entfällt.
- Die Steuerung und Regelung solcher Anlagen kann ohne Hardwareeingriffe in die Schutzstromgeräte bei Bedarf angepasst werden.

In Abb. 14.1 ist der prinzipielle Aufbau einer solchen Anlage dargestellt.

Dabei sind an einen zentralen Rechner über ein Buskabel acht verschiedene steuerbare Gleichrichter in Reihe verschaltet.

Über das Buskabel werden gleichzeitig auch die Ausgangsspannungen und Ausgangsströme der Gleichrichter, das Schutzpotential in dem Bereich über angeschlossene Referenzelektroden sowie die Anodeneinzelströme über Shuntmessungen übertragen.

Ein wesentlicher Bestandteil der Fernüberwachungs- und Steuerungsanlage ist die auf dem zentralen Rechner laufende Software. Diese stellt die Schnittstelle zwischen der kathodischen Korrosionsschutzanlage und dem Bediener dar. Sie sollte daher einfach und intuitiv zu bedienen sein, sollte aber auch die Möglichkeiten tiefer gehender Änderungen an der Anlageneinstellung zulassen.

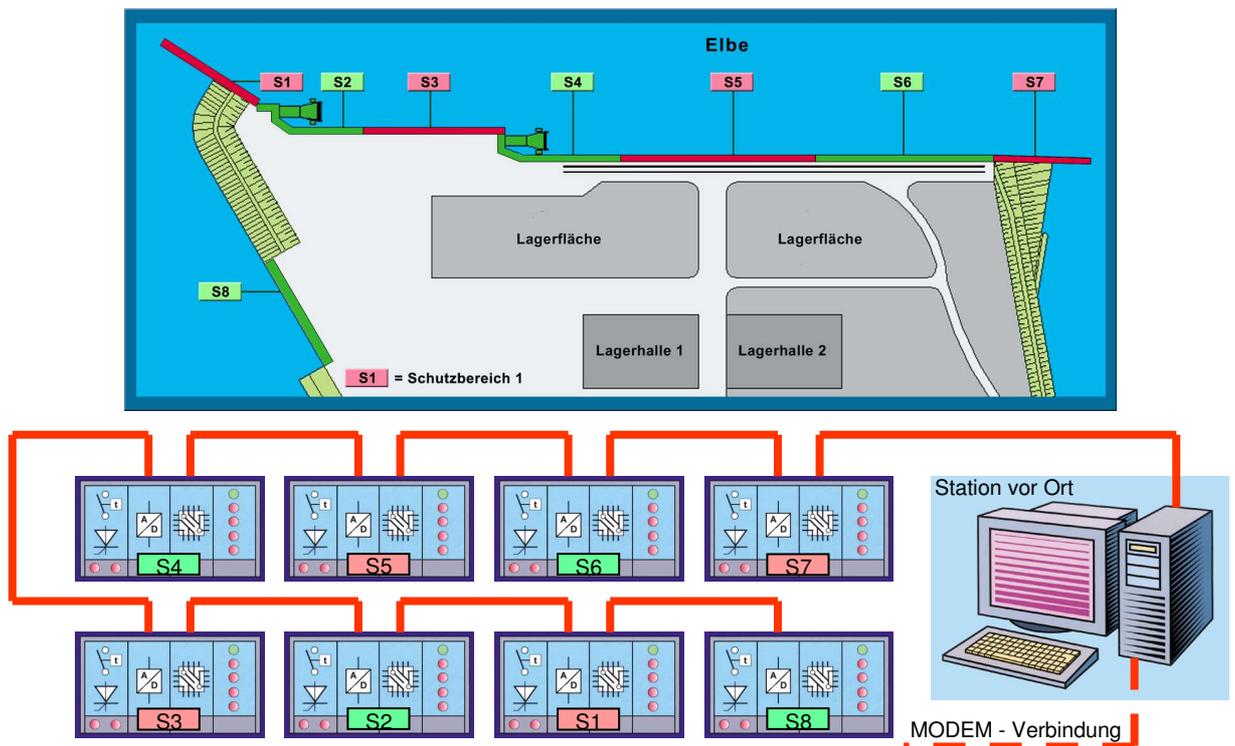


Abb. 14. 1: Aufbau einer Fernsteuerung (Systemdarstellung)

Folgende Aufgaben sollte die Software zur Verfügung stellen:

- Übersicht der Anlage mit Darstellung des Anlagenzustandes und Fehlermeldungen
- Detaildarstellung der einzelnen Schutzbereiche
- Archivierung von Fehlermeldungen
- Archivierung von Messwerten
- Darstellung aktueller und historischer Fehlermeldungen und Messwerte (wenn möglich auch grafisch)
- Anzeige der aktuellen Werte und Zustände der Schutzstromgeräte
- Änderungsmöglichkeit der Betriebsparameter der Schutzstromgeräte, wie Regelungsmodi (Spannungskonstant, Stromkonstant, Potentialkonstant, Handbedienung), Sollwerte, Grenzwerte
- Anzeige und Änderung aller sonstigen für die Anlage relevanter Parameter und Werte
- Zugriffsregelung zu den Funktionen des Programms nach verschiedenen Benutzern (Passwortgeschützt). Dadurch soll verhindert werden, dass z.B. Überwachungspersonal Änderungen an den Regelungsparametern vornehmen kann

- Automatische Störmeldeprotokollierung und periodische Messprotokollausgabe auf einen Drucker
- Möglichkeit der Fehlersignalisierung per Fax, SMS oder E-Mail

Zur Sicherstellung der Schutzfunktion der kathodischen Korrosionsschutzanlage ist jedoch auch mit einer solchen Anlage eine regelmäßige Überprüfung in Zusammenhang mit örtlichen Messungen an dem Wasserbauwerk notwendig, um eventuelle Problemstellen zu erkennen und Gegenmaßnahmen einzuleiten.