



# Handbuch des kathodischen Korrosionsschutzes

Theorie und Praxis der  
elektrochemischen Schutzverfahren

Vierte, völlig neubearbeitete Auflage

Herausgegeben von  
W.v. Baeckmann und W. Schwenk

 **WILEY-VCH**

Weinheim · New York · Chichester  
Brisbane · Singapore · Toronto

Aus technischen Gründen bleibt diese Seite leer

# **Handbuch des kathodischen Korrosionsschutzes**

Herausgegeben von  
W. v. Baeckmann und W. Schwenk



Kathodischer Korrosionsschutz

## **KKS**

### **Kathodischer Korrosionsschutz für:**

erdverlegte Stahl-Rohrleitungen  
vermaschte Stadtnetze  
erdverlegte Tankbehälter  
110 kV-Gasdruckkabel  
Spundwände

### **Unsere Leistungen:**

Untersuchungen  
Erstellen von Studien und Gutachten  
Planung und Errichtung von KKS-Anlagen  
Planung und Errichtung von Tiefenanoden  
Störstellenortungen  
Intensivmessungen  
Nach- und Überwachungsmessungen  
Bau von KKS-Gleichrichtern  
Streustromuntersuchungen und Erstellung von Schutzkonzepten

## **WSC – EWA**

**Wechselstromkompensationsanlagen und Einwegableitungen** zum Schutz gegen Wechselstromkorrosion durch induzierte Spannungen aus:

- Hochspannungsfreileitungen
- Bahnstromanlagen

### **Unsere Leistungen:**

- Untersuchungen nach DIN 50925 auf Wechselstromdichte und Rohrleitungspotential (AC)
- Planung und Errichtung von WSC- und EWA-Anlagen
- Inbetriebnahme und Überwachung von WSC- und EWA-Anlagen

### **Fordern Sie unser Info-Material an:**

MARTIN GmbH  
Werksstr. 18 • 45527 Hattingen  
Tel.: 02324 5985-0 • Fax: 02324 5985-40  
Email: [info@martin-gmbh.de](mailto:info@martin-gmbh.de)  
DVGW-Bescheinigung nach GW 11

# Handbuch des kathodischen Korrosionsschutzes

Theorie und Praxis der  
elektrochemischen Schutzverfahren

Vierte, völlig neubearbeitete Auflage

Herausgegeben von  
W.v. Baeckmann und W. Schwenk

 **WILEY-VCH**

Weinheim · New York · Chichester  
Brisbane · Singapore · Toronto

Dipl.-Phys. W. v. Baeckmann  
Ulmenstraße 12  
45133 Essen

Prof. Dr. W. Schwenk  
Scheffelstraße 26  
47057 Duisburg

Das vorliegende Werk wurde sorgfältig erarbeitet. Dennoch übernehmen Autoren, Herausgeber und Verlag für die Richtigkeit von Angaben, Hinweisen und Ratschlägen sowie für eventuelle Druckfehler keine Haftung.

1. Auflage 1971, Nachdruck der 1. Auflage 1974
- 2., völlig neubearbeitete Auflage 1980
- 3., völlig neubearbeitete Auflage 1989
- 4., völlig neubearbeitete Auflage 1999

Die Deutsche Bibliothek – CIP-Einheitsaufnahme  
**Handbuch des kathodischen Korrosionsschutzes** :  
Theorie und Praxis der elektrochemischen Schutzverfahren /  
hrsg. von W. v. Baeckmann ... – 4., veränd. Aufl. –  
Weinheim ; New York ; Chichester ; Brisbane ; Singapore ;  
Toronto : Wiley-VCH, 1999  
ISBN 3-527-29586-0

© WILEY-VCH Verlag GmbH, D-69469 Weinheim (Federal Republic of Germany), 1999

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Alle Rechte, insbesondere die der Übersetzung in andere Sprachen, vorbehalten. Kein Teil dieses Buches darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form – durch Photokopie, Mikroverfilmung oder irgendein anderes Verfahren – reproduziert oder in eine von Maschinen, insbesondere von Datenverarbeitungsmaschinen, verwendbare Sprache übertragen oder übersetzt werden. Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen, Handelsnamen oder sonstigen Kennzeichen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, daß diese von jedermann frei benutzt werden dürfen. Vielmehr kann es sich auch dann um eingetragene Warenzeichen oder sonstige gesetzliche geschützte Kennzeichen handeln, wenn sie nicht eigens als solche markiert sind.

All rights reserved (including those of translation into other languages). No part of this book may be reproduced in any form – by photoprinting, microfilm, or any other means – nor transmitted or translated into a machine language without written permission from the publishers. Registered names, trademarks, etc. used in this book, even when not specifically marked as such, are not to be considered unprotected by law.

Satz und Druck: Konrad Triltsch, Druck- und Verlagsanstalt GmbH, D-97070 Würzburg  
Bindung: Großbuchbinderei J. Schäffer, D-67269 Grünstadt  
Printed in the Federal Republic of Germany

## Vorwort zur vierten Auflage

Wie bei den vorhergehenden Auflagen liegt wiederum nach etwa 10 Jahren eine teilweise völlig überarbeitete Neuauflage vor. Im wesentlichen wurde aber das Gerüst der 3. Auflage mit den 24 Kapiteln unverändert beibehalten. Einige anwendungsbezogene Abschnitte wurden stark gekürzt, um Platz für neue Erkenntnisse zu schaffen.

Die einleitenden Grundlagenkapitel und die Kapitel über Rohrleitungen und Streustrombeeinflussung wurden völlig überarbeitet oder ergänzt. Bei allen Kapiteln wurde der Bezug auf Normen und Regelwerke, insbesondere auch die internationale Normung, auf den letzten Stand gebracht. Durchgehend wurden bei allen Kapiteln Überarbeitungen und Textbegrädigungen vorgenommen.

Bei den Grundlagen der elektrochemischen Korrosion und der Erdbodenkorrosion wurden – entsprechend den neueren Erkenntnissen – die Abschnitte über Korrosion unter Rißbildung und über Wechselstrom-Korrosion ergänzt. Die Grundlagen der Meßtechnik wurden erheblich ausgeweitet, wobei neben der IR-freien Potentialmessung vor allem die verschiedenen Arten der Vergleichsmessungen beschrieben werden. Wird bei der Intensivmeßtechnik letztlich nur der Fehler der Potentialmessung minimiert, so liegt bei den Vergleichsmessungen ein völlig neuartiges Konzept vor, das mit Hilfe von Systemparametern die Schützbarkeit eines lokalen Schutzobjekt-Bereiches prüft. Entsprechend wurden auch die Folgerungen der neuen Meßtechnik für die Anwendung bei Rohrleitungen ausführlich beschrieben und mit Fallbeispielen erläutert. Neben den Ausführungen über den Nachweis der ausreichenden kathodischen Schutzwirkung werden auch Schutzmaßnahmen gegen Wechselstrombeeinflussung eingehend behandelt.

Beim elektrochemischen Innenschutz – im wesentlichen als Schutz-Maßnahme bei Apparaten und Behältern bekannt – wurden neuere Anwendungen nunmehr auch bei Anlagen mit Rohrleitungen beschrieben.

Die Herausgeber danken allen Mitarbeitern, die teils schon bei den Voraufgaben beteiligt waren und teils dem Nachwuchs angehören, für ihre Mühe und dem Verlag für das bewährte fördernde Entgegenkommen bei der Gestaltung und Herausgabe dieses Handbuchs.

Duisburg,  
im Sommer 1999

W. v. BAECKMANN  
W. SCHWENK

Aus technischen Gründen bleibt diese Seite leer

## Vorwort zur ersten Auflage

Entdeckung und Gebrauch metallischer Werkstoffe am Ende der Steinzeit zählen zu den wichtigsten Voraussetzungen für die Entwicklung der heutigen Technik. Leider sind die meisten Gebrauchsmetalle nicht immer und überall genügend beständig. In einer ungünstigen Umgebung können sie mehr oder weniger schnell durch Korrosion zerstört werden. Die Untersuchung derartiger Korrosionsreaktionen sowie der Verfahren, mit denen sich Metalle vor Korrosionsangriffen schützen lassen, ist eine Aufgabe von erheblicher wirtschaftlicher Bedeutung.

Wissenschaftlich können die Vorgänge beim kathodischen Korrosionsschutz exakter erfaßt werden als bei anderen Schutzverfahren. Bei der Metallkorrosion in wäßrigen Lösungen oder Böden handelt es sich im Prinzip um einen elektrolytischen Vorgang, der durch eine elektrische Spannung – das Potential des Metalls in der Elektrolytlösung – gesteuert wird. Bei einer Verringerung des Potentials muß nach den Gesetzen der Elektrochemie die Reaktionsaffinität und damit auch die Reaktionsgeschwindigkeit abnehmen. Obwohl diese Zusammenhänge seit mehr als hundert Jahren bekannt sind und der kathodische Schutz vereinzelt auch schon sehr früh praktiziert wurde, hat die Verbreitung seiner technischen Anwendung sehr lange auf sich warten lassen. Man ist geneigt anzunehmen, daß das kathodische Schutzverfahren in manchen Bereichen als zu fremd empfunden wurde und daß die erforderlichen elektrotechnischen Überlegungen von seiner praktischen Anwendung abhielten. Im Vergleich zu den theoretischen Grundlagen ist die Praxis des kathodischen Schutzes in der Tat wesentlich komplizierter.

Über viele Einzelprobleme und Anwendungsbeispiele gibt es inzwischen eine umfangreiche fremdsprachige Fachliteratur. Da ein zusammenfassendes Werk in deutscher Sprache über den derzeitigen Stand der Kenntnisse bisher nicht vorlag, war es für den Praktiker recht mühsam, sich in dieses Fachgebiet einzuarbeiten. Der DVGW-Fachausschuß für Korrosionsfragen hat deshalb die Herausgabe dieses Handbuches über den kathodischen Schutz angeregt und eine Reihe seiner Mitglieder haben sich dankenswerterweise als Autoren einzelner Kapitel zur Verfügung gestellt.

In diesem Handbuch wird vorwiegend die Praxis des kathodischen Schutzes behandelt, aber auch die Grundlagen und Nachbarggebiete werden besprochen, soweit sie für ein möglichst umfassendes Verständnis des kathodischen Schutzes notwendig sind. Einleitend hielten wir eine historische Übersicht für nützlich, um den technischen Werdegang des Schutzverfahrens darzulegen. Im anschließenden Kapitel werden die erforderlichen theoretischen Grundlagen der Metallkorrosion und des Korrosionsschutzes behandelt. Mit Absicht werden verschiedene Werkstoff/Medium-Paarungen dargestellt, um die vielfältigen Einsatzmöglichkeiten elektrochemischer Schutzverfahren zu verdeutlichen.

Zur Zeit wird der kathodische Korrosionsschutz nur im Bereich natürlicher Wässer und Böden allgemein angewandt. Für die Zukunft sind aber auch bei industriellen Anlagen und Behältern Anwendungsmöglichkeiten zu sehen. Daher wurde ein Kapitel über den anodischen Schutz aufgenommen, der erst in den letzten zehn Jahren vereinzelt praktiziert wird. Kathodischer und anodischer Schutz sind im Prinzip sehr ähnliche Verfahren und rechtfertigen den Begriff *elektrochemischer Schutz* im Untertitel des Buches.

In den meisten Anwendungsfällen wird der kathodische Schutz mit einem passiven Schutzsystem, einer Beschichtung, kombiniert. Wegen der hierbei möglichen mannigfaltigen Wechselwirkungen erschien auch die Behandlung passiver Schutzverfahren notwendig. Ferner wurde ein Kapitel über allgemeine Meßtechnik eingefügt, da sich gerade in der Praxis des kathodischen Schutzes immer wieder zeigt, wie wichtig ein sorgfältiges Durchdenken der Meßprobleme ist. Es erfordert Erfahrung, mögliche Fehlerquellen einzukalkulieren, und es ist notwendig, überraschende Meßergebnisse stets durch eine unabhängige Kontrollmessung zu überprüfen. Meßprobleme spielen auch eine besondere Rolle bei Fremdstromanlagen, bei denen man sich vergegenwärtigen muß, daß eine falsch gepolte Anlage stets intensive Korrosion erzeugt. Sie ist sogar gefährlicher als ein unterlassener oder ausgefallener Korrosionsschutz.

In den weiteren Kapiteln werden ausführlich Eigenschaften und Anwendung galvanischer Anoden, kathodischer Schutzgleichrichter einschließlich der besonderen Geräte für den Streustromschutz und von Fremdstromanoden erörtert. Als Anwendungsgebiete werden behandelt: erdverlegte Rohrleitungen, Lagerbehälter, Tankläger, Fernmelde-, Starkstrom- und Druckgaskabel, Schiffe, Hafenanlagen und der Innenschutz von Brauchwasser- und Industrieanlagen. Ein besonderes Kapitel befaßt sich mit dem Problem hochspannungsbeeinflusster Rohrleitungen und Kabel. Eine Betrachtung über Kosten und wirtschaftliche Gesichtspunkte bildet den Abschluß. In einem Anhang haben wir Übersichts-Tabellen und mathematische Ableitungen zusammengestellt, soweit sie uns für die praktische Anwendung und Vervollständigung des Buches wichtig erschienen.

Die Herausgeber danken allen Mitarbeitern für ihre Mühe, der Ruhrgas AG und der Mannesmann-Forschungsinstitut GmbH für freundliche Unterstützung sowie dem Verlag Chemie für großzügiges Entgegenkommen bei der Herausgabe und Gestaltung des Handbuches.

Essen und Duisburg,  
im Frühjahr 1971

W. v. BAECKMANN  
W. SCHWENK

# Inhalt

<b>1</b>	<b>Historische Entwicklung des elektrochemischen Korrosionsschutzes</b> . . . . .	<b>1</b>
	W. V. BAECKMANN	
1.1	Geschichte des kathodischen Schutzes . . . . .	1
1.2	Entwicklung des Streustromschutzes . . . . .	7
1.3	Entwicklung der Passivität und des anodischen Schutzes . . . . .	10
1.4	Korrosionsschutz durch Beschichtungen und Umhüllungen . . . . .	11
1.5	Korrosionsschutz durch Information . . . . .	12
1.6	Literatur . . . . .	12
<b>2</b>	<b>Grundlagen und Begriffe der Korrosion und des elektrochemischen Korrosionsschutzes</b> . . . . .	<b>15</b>
	W. SCHWENK	
2.1	Was sind Korrosionsvorgänge, Korrosionsschäden und Schutzmaßnahmen? . . . . .	15
2.2	Elektrochemische Korrosion . . . . .	17
2.2.1	Die metallischen Werkstoffe . . . . .	18
2.2.2	Die wäßrigen Elektrolytlösungen . . . . .	21
2.2.3	Elektrochemische Phasengrenzreaktionen . . . . .	24
2.2.3.1	Thermodynamische Grundlagen . . . . .	24
2.2.3.2	Elektrochemische Kinetik . . . . .	27
2.2.4	Mischelektroden . . . . .	30
2.2.4.1	Homogene Mischelektroden . . . . .	30
2.2.4.2	Heterogene Mischelektroden und Elementbildung . . . . .	32
2.2.5	Bemerkungen zur Stromverteilung . . . . .	36
2.3	Die Potentialabhängigkeit von Korrosionsgrößen . . . . .	37
2.3.1	Nahezu gleichförmiger Flächenabtrag . . . . .	38
2.3.1.1	Flächenkorrosion aktiver Metalle . . . . .	38
2.3.1.2	Flächenkorrosion passiver Metalle . . . . .	43
2.3.2	Lochkorrosion . . . . .	45
2.3.3	Spannungsrißkorrosion . . . . .	47

X	Inhalt	
2.3.4	Wasserstoff-induzierte Rißkorrosion . . . . .	49
2.3.5	Schwingungsrißkorrosion (Korrosionsermüdung) . . . . .	52
2.3.6	Dehnungsinduzierte Rißkorrosion . . . . .	54
2.3.7	Anwendungsgrenzen für elektrochemische Schutzverfahren . . . . .	54
2.4	Zusammenstellung von Schutzpotentialen bzw. -bereichen . . . . .	55
2.5	Literatur . . . . .	59
<b>3</b>	<b>Grundlagen und Praxis der elektrischen Meßtechnik . . . . .</b>	<b>63</b>
	W. v. BAECKMANN, J. GEISER und W. SCHWENK	
3.1	Die elektrischen Meßgrößen: Strom, Spannung und Widerstand . . . . .	63
3.2	Bezugselektroden . . . . .	65
3.3	Die Potentialmessung und Schutzkriterien . . . . .	69
3.3.1	Schutzobjekte mit einer oder mit gleichen Fehlstellen . . . . .	69
3.3.2	Schutzobjekte mit mehreren unterschiedlichen Fehlstellen . . . . .	73
3.3.3	Intensivmeßtechnik . . . . .	77
3.3.3.1	Grundlagen und Meßgrößen der Intensivmeßtechnik . . . . .	77
3.3.3.2	Durchführung einer Intensivmessung . . . . .	80
3.3.3.3	Fehlerquellen bei der Intensivmessung . . . . .	82
3.3.4	Potentialvergleichsmessung mit externer Meßprobe . . . . .	83
3.3.5	Polarisation-Vergleichsmessungen . . . . .	85
3.3.6	Pragmatische Schutzkriterien . . . . .	87
3.3.7	Potentialmessung in der Anwendung . . . . .	89
3.3.7.1	Meßgeräte und ihre Eigenschaften . . . . .	89
3.3.7.2	Potentialmessungen an Rohrleitungen und Behältern . . . . .	91
3.3.7.3	Potentialmessung bei Streustrom-Beeinflussung . . . . .	93
3.3.7.4	Potentialmessung bei Wechselstromeinfluß . . . . .	94
3.4	Die Strommessung . . . . .	95
3.4.1	Allgemeine Hinweise für Strommessungen . . . . .	95
3.4.2	Die Rohrstrom-Messung . . . . .	96
3.4.3	Die Messung der Schutzstromdichte und des Umhüllungswiderstandes . . . . .	97
3.5	Die Widerstandsmessung . . . . .	100
3.5.1	Widerstandsmeßgeräte . . . . .	100
3.5.2	Messung des spezifischen Bodenwiderstandes . . . . .	101
3.5.3	Messung des Ausbreitungswiderstandes . . . . .	105
3.6	Fehlerortung . . . . .	106
3.6.1	Fehlerortung bei Rohrleitungen . . . . .	106
3.6.2	Messung von Fremdkontakten . . . . .	108
3.6.2.1	Ortung mit Gleichstrom . . . . .	108
3.6.2.2	Ortung mit Wechselstrom . . . . .	109

3.6.3	Ortung heterogener Oberflächenbereiche durch Feldstärkemessungen . . . . .	110
3.6.3.1	Ortung von Lokalanoden . . . . .	110
3.6.3.2	Ortung von Umhüllungsschäden . . . . .	113
3.6.3.3	Feldverteilung bei fehlender oder poröser Umhüllung . . . . .	116
3.7	Fernüberwachung des kathodischen Schutzes . . . . .	117
3.8	Schutzkriterien und Meßgrößen bei Wechselstrom-Belastung . . . . .	118
3.9	Literatur . . . . .	120
<b>4</b>	<b>Korrosion in Wässern und Erdböden . . . . .</b>	<b>123</b>
	TH. HEIM und W. SCHWENK	
4.1	Wirkung der Korrosionsprodukte und Korrosionsarten . . . . .	123
4.2	Beurteilung der Korrosionswahrscheinlichkeit unbeschichteter Metalle	125
4.2.1	Korrosion in Böden . . . . .	127
4.2.2	Korrosion in Wässern . . . . .	130
4.3	Korrosion bei anodischer Beeinflussung durch Elementbildung oder Streuströme aus Gleichstromanlagen . . . . .	130
4.4	Korrosion durch Wechselstrombeeinflussung . . . . .	132
4.5	Korrosion in Spalten und unter loser Beschichtung . . . . .	134
4.6	Literatur . . . . .	136
<b>5</b>	<b>Beschichtungen und Überzüge für den Korrosionsschutz . . . . .</b>	<b>139</b>
	TH. HEIM und W. SCHWENK	
5.1	Zweck und Arten des passiven Korrosionsschutzes . . . . .	139
5.1.1	Organische Beschichtungen . . . . .	140
5.1.2	Mörtelbeschichtungen . . . . .	140
5.1.3	Emailüberzüge . . . . .	141
5.1.4	Metallische Überzüge . . . . .	141
5.2	Eigenschaften organischer Beschichtungen . . . . .	141
5.2.1	Elektrische und elektrochemische Eigenschaften . . . . .	141
5.2.1.1	Übersicht der Reaktionsarten . . . . .	141
5.2.1.2	Umhüllungswiderstände und Schutzstrombedarf . . . . .	143
5.2.1.3	Kathodische Wirksamkeit und Elementbildung . . . . .	146
5.2.1.4	Elektrochemische Blasenbildung und Elektroosmose . . . . .	147
5.2.1.5	Kathodische Unterwanderung . . . . .	150
5.2.2	Physikalisch-chemische Eigenschaften . . . . .	153
5.2.3	Mechanische Eigenschaften . . . . .	154
5.2.4	Grenzen der Schutzwirkung organischer Beschichtungen . . . . .	155

XII	Inhalt	
5.3	Eigenschaften von Zementmörtel und Beton . . . . .	156
5.3.1	Korrosion des Mörtels . . . . .	157
5.3.2	Korrosion des Stahls im Mörtel . . . . .	157
5.4	Eigenschaften von Emailüberzügen . . . . .	159
5.5	Eigenschaften von metallischen Überzügen . . . . .	159
5.6	Literatur . . . . .	160
<b>6</b>	<b>Galvanische Anoden</b> . . . . .	<b>163</b>
	G. FRANKE und B. RICHTER	
6.1	Allgemeine Hinweise . . . . .	163
6.1.1	Strominhalt galvanischer Anoden . . . . .	164
6.1.2	Stromabgabe galvanischer Anoden . . . . .	168
6.2	Anodenmaterialien . . . . .	169
6.2.1	Eisen . . . . .	169
6.2.2	Zink . . . . .	170
6.2.3	Aluminium . . . . .	171
6.2.4	Magnesium . . . . .	172
6.3	Bettungsmassen . . . . .	175
6.4	Halterungen . . . . .	176
6.5	Anodenformen . . . . .	177
6.5.1	Stabanoden . . . . .	177
6.5.2	Platten- oder Blockanoden . . . . .	178
6.5.3	Tankanoden . . . . .	179
6.5.4	Offshore-Anoden . . . . .	179
6.5.5	Sonderformen . . . . .	180
6.6	Qualitäts- und Eignungsprüfung . . . . .	180
6.7	Vor- und Nachteile galvanischer Anoden . . . . .	181
6.8	Literatur . . . . .	182
<b>7</b>	<b>Fremdstrom-Anoden</b> . . . . .	<b>183</b>
	D. FUNK	
7.1	Allgemeine Hinweise . . . . .	183
7.2	Anodenmaterialien . . . . .	184
7.2.1	Massivanoden . . . . .	184
7.2.2	Edelmetalle und Edelmetall-beschichtete Ventilmetalle . . . . .	190
7.2.3	Metalloxid-beschichtete Ventilmetalle . . . . .	192
7.2.4	Kunststoff-Kabelanoden . . . . .	192

7.3	Isolierstoffe . . . . .	192
7.4	Kabel . . . . .	193
7.5	Anodenformen . . . . .	194
7.5.1	Anoden für Erdbodenverlegung . . . . .	194
7.5.2	Anoden für Wässer . . . . .	196
7.5.3	Anoden für den Innenschutz . . . . .	197
7.6	Literatur . . . . .	198
<b>8</b>	<b>Fremdstrom-Anlagen und Schutzstrom-Geräte</b> . . . . .	<b>201</b>
	W. v. BAECKMANN und W. VESPER	
8.1	Standort und elektrische Schutzmaßnahmen . . . . .	201
8.2	Auslegung und Schaltung der Schutzstrom-Geräte . . . . .	203
8.3	Gleichrichter-Schaltung . . . . .	204
8.4	Einstellbare Schutzstrom-Geräte . . . . .	206
8.5	Hochspannungsfeste Schutzstrom-Geräte . . . . .	207
8.6	Regelnde Schutzstrom-Geräte . . . . .	209
8.7	Netzunabhängige Schutzstrom-Geräte . . . . .	212
8.8	Ausrüstung und Überwachung von Schutzstrom-Geräten . . . . .	213
8.9	Literatur . . . . .	216
<b>9</b>	<b>Fremdstromanoden-Anlagen im Erdboden und Beeinflussungsfragen</b> . . . . .	<b>217</b>
	W. v. BAECKMANN, J. GEISER und W. VESPER	
9.1	Fremdstromanoden-Anlagen . . . . .	218
9.1.1	Durchgehende horizontale Anodenanlagen . . . . .	218
9.1.2	Einzelanoden-Anlagen . . . . .	221
9.1.3	Tiefenanoden-Anlagen . . . . .	223
9.2	Beeinflussung fremder Rohrleitungen und Kabel . . . . .	227
9.2.1	Beeinflussung durch den Spannungstrichter der Anoden . . . . .	227
9.2.2	Beeinflussung durch den kathodischen Spannungstrichter des Schutzobjektes . . . . .	229
9.2.3	Aufhebung der Beeinflussung . . . . .	231
9.3	Literatur . . . . .	234

<b>10</b>	<b>Rohrleitungen</b> . . . . .	235
	J. GEISER, B. LEUTNER und F. SCHWARZBAUER	
10.1	Elektrische Eigenschaften von Rohrleitungen aus Stahl . . . . .	235
10.1.1	Allgemeine Angaben . . . . .	235
10.1.2	Maßnahmen für einen kleinen Widerstandsbelag . . . . .	236
10.1.3	Maßnahmen für einen kleinen Ableitungsbelag . . . . .	236
10.1.3.1	Rohrumhüllungen . . . . .	236
10.1.3.2	Isolierverbindungen . . . . .	237
10.1.3.3	Elektrisch betriebene Armaturen . . . . .	238
10.2	Sonderkonstruktionen an Rohrleitungen . . . . .	239
10.2.1	Vermeiden von Fremdkontakten . . . . .	240
10.2.2	Mantelrohre und begrenzte Leitungsabschnitte mit grabenloser Verlegung . . . . .	241
10.3	Rohrleitungen für elektrolytisch leitende Flüssigkeiten . . . . .	243
10.4	Planung des kathodischen Korrosionsschutzes . . . . .	246
10.4.1	Planung für fertig verlegte Objekte . . . . .	246
10.4.1.1	Rohrleitungen . . . . .	246
10.4.1.2	Verteilungsnetze . . . . .	250
10.4.2	Planungen für gesonderte Rohrleitungsabschnitte . . . . .	255
10.4.2.1	Ziele der Planung . . . . .	255
10.4.2.2	Vermaschte Netze . . . . .	256
10.4.2.3	Grabenlos verlegte Mantelrohre und Düker . . . . .	257
10.5	Inbetriebnahme des kathodischen Schutzes . . . . .	258
10.6	Überwachung des kathodischen Schutzes . . . . .	260
10.7	Schutzmaßnahmen gegen Wechselstromkorrosion . . . . .	261
10.7.1	Kriterien und Schutzmaßnahmen . . . . .	261
10.7.2	Wahl der Schutzmaßnahmen . . . . .	262
10.7.2.1	Einbau von Isolierkupplungen . . . . .	263
10.7.2.2	Erden der Rohrleitung . . . . .	263
10.7.2.3	Kompensation durch galvanische Ankopplung . . . . .	263
10.7.3	Anwendungsbereiche . . . . .	265
10.7.3.1	Beeinflussung durch Hochspannung-Freileitungen . . . . .	265
10.7.3.2	Beeinflussung durch Bahnströme . . . . .	265
10.7.4	Betrieb und Überwachung . . . . .	265
10.8	Literatur . . . . .	266
<b>11</b>	<b>Lagerbehälter und Tankläger</b> . . . . .	267
	U. BETTE, K. HORRAS und G. RIEGER	
11.1	Besondere Probleme beim Behälterschutz . . . . .	267
11.2	Vorbereitende Maßnahmen . . . . .	267

11.3	Lagerbehälter . . . . .	269
11.3.1	Schutzstrombestimmung, Beurteilung und Anschlüsse der Schutzanlagen . . . . .	269
11.3.2	Wahl des Schutzverfahrens . . . . .	272
11.3.3	Beispiele für die Auslegung von Schutzanlagen . . . . .	272
11.3.3.1	Schutzanlage mit galvanischen Anoden . . . . .	272
11.3.3.2	Schutzanlage mit Fremdstrom . . . . .	274
11.4	Tankläger und Betankungsanlagen . . . . .	276
11.5	Besonderheiten beim kathodischen Schutz im Bereich von Eisenbahnen . . . . .	277
11.5.1	Allgemeine Hinweise . . . . .	277
11.5.2	Potentialausgleichsleitungen und Trennungen . . . . .	278
11.5.3	Schutzerdung an elektrischen Bahnen . . . . .	278
11.5.4	Blitzschutz . . . . .	279
11.5.5	Beeinflussung und Arbeiten im Bahnbereich . . . . .	280
11.6	Maßnahmen bei Mischinstallationen . . . . .	280
11.7	Innenschutz von Heizölbehältern . . . . .	281
11.8	Berücksichtigung anderer Schutzmaßnahmen . . . . .	282
11.9	Betrieb und Wartung kathodischer Schutzanlagen . . . . .	284
11.10	Literatur . . . . .	284
<b>12</b>	<b>Lokaler kathodischer Korrosionsschutz</b> . . . . .	<b>287</b>
	W. v. BAECKMANN und J. GEISER	
12.1	Anwendungsbereiche . . . . .	287
12.2	Besonderheiten des Lokalen kathodischen Korrosionsschutzes . . . . .	288
12.3	Kraftwerke . . . . .	290
12.4	Gasanlagen . . . . .	293
12.5	Anlagen mit kleinen Stahl-Beton-Fundamenten . . . . .	294
12.6	Tankläger . . . . .	296
12.7	Literatur . . . . .	299
<b>13</b>	<b>Fernmeldekabel</b> . . . . .	<b>301</b>
	C. GEY und T. HOFFMANN	
13.1	Allgemeines . . . . .	301
13.2	Passiver Korrosionsschutz . . . . .	301

XVI Inhalt

13.3	Kathodischer Korrosionsschutz . . . . .	303
13.3.1	Allgemeine Angaben . . . . .	303
13.3.2	Streustrom-Schutz . . . . .	304
13.3.3	Kathodischer Schutz mit Fremdstrom-Anoden . . . . .	304
13.4	Literatur . . . . .	308
<b>14</b>	<b>Starkstromkabel . . . . .</b>	<b>309</b>
	H.-U. PAUL und CH. DÖRNEMANN	
14.1	Eigenschaften erdverlegter Starkstromkabel . . . . .	309
14.2	Kathodischer Korrosionsschutz für Stahlrohre von Hochspannungskabeln . . . . .	310
14.2.1	Anforderungen an Abgrenzeinheiten . . . . .	311
14.2.2	Bauformen von Abgrenzeinheiten . . . . .	312
14.2.2.1	Niederohmige Widerstände . . . . .	312
14.2.2.2	Höherohmige Widerstände . . . . .	313
14.2.2.3	Abgrenzeinheit mit Nickel-Cadmium-Zelle . . . . .	313
14.2.2.4	Polarisationszelle . . . . .	314
14.2.2.5	Abgrenzeinheiten mit Siliciumdioden . . . . .	315
14.2.3	Errichtung von kathodischen Korrosionsschutzanlagen . . . . .	317
14.2.4	Kontrolle des kathodischen Schutzes . . . . .	317
14.3	Streustrom-Schutz . . . . .	318
14.4	Literatur . . . . .	319
<b>15</b>	<b>Streustrom-Beeinflussung und Streustrom-Schutz . . . . .</b>	<b>321</b>
	W. V. BAECKMANN, U. BETTE und W. VESPER	
15.1	Ursachen der Streustrom-Beeinflussung . . . . .	321
15.1.1	Gleichstrom erzeugende Anlagen . . . . .	321
15.1.2	Allgemeine Maßnahmen an Gleichstrom-Anlagen . . . . .	322
15.2	Streuströme von Gleichstrombahnen . . . . .	322
15.2.1	Ursachen der Streustromkorrosion . . . . .	322
15.2.2	Bestimmungen für Gleichstrombahnen . . . . .	324
15.2.2.1	Allgemeine Anforderungen . . . . .	324
15.2.2.2	Spezielle Anforderungen an Tunneln von Gleichstrombahnen . . . . .	325
15.3	Streuströme aus Hochspannung-Gleichstrom-Übertragungsanlagen . . . . .	328
15.4	Weiträumige Streustrombeeinflussung durch stationäre fremde Felder und tellurische Ströme . . . . .	330
15.5	Schutzmaßnahmen an durch Gleichstrombahnen beeinflussten Anlagen . . . . .	331
15.5.1	Meßtechnische Ermittlungen der Streustrombeeinflussung . . . . .	331

15.5.2	Arbeitsweise von Streustrom-Schutzmaßnahmen . . . . .	337
15.5.3	Auswahl und Auslegung von Streustrom-Schutzanlagen . . . . .	338
15.6	Streustrom-Schutzmaßnahmen in Hafenanlagen und auf Werften . . . . .	340
15.7	Literatur . . . . .	341
<b>16</b>	<b>Seebauwerke und Offshore-Rohrleitungen . . . . .</b>	<b>343</b>
	B. RICHTER und D. ENGEL	
16.1	Kathodische Korrosionsschutzverfahren . . . . .	343
16.1.1	Auslegungskriterien . . . . .	344
16.1.2	Schutz mit galvanischen Anoden . . . . .	347
16.1.3	Schutz mit Fremdstrom . . . . .	347
16.2	Plattformen . . . . .	348
16.2.1	Stahlbauwerke . . . . .	348
16.2.2	Betonbauwerke . . . . .	350
16.3	Hafenanlagen . . . . .	351
16.3.1	Fremdstrom-Anlagen . . . . .	352
16.3.2	Schutz mit galvanischen Anoden . . . . .	353
16.4	Spundwände . . . . .	353
16.5	Pfahlgründungen . . . . .	354
16.6	Offshore-Rohrleitungen . . . . .	357
16.7	Kontrolle des kathodischen Schutzes . . . . .	358
16.7.1	Produktionsplattformen . . . . .	358
16.7.2	Hafenbauwerke . . . . .	359
16.7.3	Seeverlegte Rohrleitungen . . . . .	359
16.8	Literatur . . . . .	362
<b>17</b>	<b>Kathodischer Schutz von Schiffen . . . . .</b>	<b>363</b>
	B. RICHTER und D. ENGEL	
17.1	Wasserseitige Einflußgrößen . . . . .	363
17.1.1	Gelöste Salze und Feststoffe . . . . .	363
17.1.2	Belüftung und Sauerstoffgehalt . . . . .	364
17.1.3	Strömungsgeschwindigkeit beim fahrenden Schiff . . . . .	365
17.1.4	Temperatur- und Konzentrationsdifferenzen . . . . .	365
17.2	Werkstoffseitige Einflußgrößen und Beschichtungen . . . . .	366
17.3	Kathodischer Korrosionsschutz des Unterwasserschiffes . . . . .	368
17.3.1	Berechnung des Schutzstrombedarfs . . . . .	369

XVIII Inhalt

17.3.2	Schutz durch galvanische Anoden . . . . .	370
17.3.2.1	Größe und Anzahl der Anoden . . . . .	370
17.3.2.2	Anordnung der Anoden . . . . .	372
17.3.2.3	Kontrolle des kathodischen Schutzes . . . . .	373
17.3.3	Schutz durch Fremdstrom . . . . .	373
17.3.3.1	Stromversorgung und Schutzgleichrichter . . . . .	374
17.3.3.2	Fremdstrom-Anoden und Meßelektroden . . . . .	375
17.3.3.3	Anordnung der Anoden und Meßelektroden . . . . .	377
17.4	Kathodischer Innenschutz von Tanks und Behältern . . . . .	378
17.5	Kathodischer Schutz von Wärmetauschern, Kondensatoren und Rohrleitungen . . . . .	380
17.6	Literatur . . . . .	381
<b>18</b>	<b>Kathodischer Schutz von Bohrloch-Verrohrungen</b> . . . . .	<b>383</b>
	B. LEUTNER	
18.1	Beschreibung des Schutzobjektes . . . . .	383
18.2	Ursachen der Korrosionsgefährdung . . . . .	383
18.2.1	Ausbildung von Korrosionselementen . . . . .	383
18.2.2	Freie Korrosion durch korrosive Erdschichten . . . . .	384
18.2.3	Bedingungen für Spannungsrißkorrosion . . . . .	385
18.2.4	Korrosion durch Fremdbeeinflussung . . . . .	385
18.3	Messungen zur Beurteilung der Korrosion und des Korrosionsschutzes von Bohrloch-Verrohrungen . . . . .	385
18.3.1	Untersuchungen auf Korrosionsschäden . . . . .	386
18.3.2	Messung von $\Delta U$ -Profilen . . . . .	386
18.3.3	Messung des Tafel-Potentials . . . . .	388
18.4	Planung und Bau von kathodischen Schutzanlagen . . . . .	389
18.5	Inbetriebnahme und Überwachung . . . . .	391
18.6	Literatur . . . . .	393
<b>19</b>	<b>Kathodischer Korrosionsschutz von Bewehrungsstahl in Betonbauten</b> . . . . .	<b>395</b>
	B. ISECKE	
19.1	Das Korrosionssystem Stahl/Beton . . . . .	395
19.2	Ursache der Korrosion von Stahl in Beton . . . . .	396
19.3	Elektrolytische Eigenschaften des Betons . . . . .	396
19.4	Kriterien für den kathodischen Korrosionsschutz . . . . .	397

19.5	Anwenden des kathodischen Korrosionsschutzes bei Stahlbeton-Konstruktionen . . . . .	399
19.5.1	Planung und Ausführung . . . . .	399
19.5.2	Ermittlung des Korrosionszustandes der Bewehrung . . . . .	400
19.5.3	Metallenleitende Durchverbindung . . . . .	401
19.5.4	Bautechnische Ausführungen und Anodensysteme . . . . .	401
19.5.5	Betonersatz-Systeme bei kathodischem Schutz . . . . .	403
19.5.6	Inbetriebnahme und Kontrolle . . . . .	403
19.6	Streustromgefährdung und Schutzmaßnahmen . . . . .	406
19.7	Literatur . . . . .	406
<b>20</b>	<b>Kathodischer Innenschutz von Wasserbehältern</b> . . . . .	<b>409</b>
	G. FRANKE und U. HEINZELMANN	
20.1	Beschreibung und Funktion der Schutzobjekte . . . . .	409
20.1.1	Werkstoffe für die Schutzobjekte und Installationskomponenten . . . . .	410
20.1.2	Arten der Auskleidungen und Beschichtungen . . . . .	411
20.1.3	Voraussetzungen für den kathodischen Innenschutz . . . . .	411
20.1.4	Maßnahmen zur Vermeidung einer anodischen Beeinflussung . . . . .	411
20.1.5	Maßnahmen zur Vermeidung einer Gefährdung durch Wasserstoff . . . . .	413
20.2	Schutz mit galvanischen Anoden . . . . .	415
20.3	Schutz mit Fremdstrom . . . . .	415
20.3.1	Anlagen mit Potentialregelung . . . . .	416
20.3.2	Anlagen mit Stromregelung nach dem Wasserdurchsatz . . . . .	417
20.4	Beschreibung von Schutzobjekten . . . . .	418
20.4.1	Wassererwärmer mit Emailauskleidung . . . . .	418
20.4.2	Wassererwärmer mit elektrolytischer Wasserbehandlung . . . . .	423
20.4.3	Wasserspeicher . . . . .	425
20.4.4	Filterbehälter . . . . .	428
20.5	Anforderungen bei Trinkwasser . . . . .	429
20.6	Literatur . . . . .	429
<b>21</b>	<b>Elektrochemischer Korrosionsschutz für die Innenflächen von Apparaten, Behältern und Rohren</b> . . . . .	<b>431</b>
	H. GRÄFEN, U. HEINZELMANN und F. PAULEKAT	
21.1	Besondere Maßnahmen für den elektrochemischen Innenschutz . . . . .	431
21.2	Kathodischer Schutz mit galvanischen Anoden . . . . .	433
21.3	Kathodischer Schutz mit Fremdstrom . . . . .	433
21.3.1	Kathodischer Innenschutz von Naßöltanks . . . . .	434

XX	Inhalt	
21.3.2	Kathodischer Innenschutz eines Naßgasometers	435
21.3.3	Kathodischer Innenschutz meerwassergekühlter Kraftwerkskondensatoren	435
21.3.4	Kathodischer Innenschutz von Wasserkraft-Turbinen	437
21.3.5	Kathodischer Innenschutz von Rohren	440
21.4	Anodischer Korrosionsschutz von Anlagen in der chemischen Industrie	446
21.4.1	Besondere Merkmale des anodischen Schutzes	446
21.4.2	Anodischer Schutz mit Fremdstrom	446
21.4.2.1	Vorbereitende Untersuchungen	446
21.4.2.2	Schutz gegen Säuren	448
21.4.2.3	Schutz gegen Medien unterschiedlicher Zusammensetzung	450
21.4.2.4	Schutz gegen Alkalilaugen	450
21.4.2.5	Schutzkombinationen von Fremdstrom und Inhibitoren	453
21.4.3	Schutzwirkung von Lokalkathoden	453
21.4.4	Schutzwirkung von Inhibitoren	454
21.5	Trend in der Anwendung des elektrochemischen Innenschutzes	455
21.6	Literatur	456
<b>22</b>	<b>Sicherheit und Wirtschaftlichkeit</b>	<b>459</b>
	W. v. BAECKMANN und J. GEISER	
22.1	Sicherheit und Schadensstatistik	459
22.2	Allgemeines zur Wirtschaftlichkeit	461
22.3	Wirtschaftlichkeit des kathodischen Schutzes für erdverlegte Rohrleitungen	462
22.3.1	Galvanische Anoden	462
22.3.2	Fremdstrom-Anoden	463
22.3.3	Verlängerung der Nutzungsdauer der Rohrleitung	465
22.4	Korrosionsschutz im Meerwasser	467
22.5	Kosten des Innenschutzes	468
22.5.1	Kathodischer Innenschutz	468
22.5.2	Anodischer Innenschutz	469
22.6	Literatur	469
<b>23</b>	<b>Beeinflussung von längsleitfähigen Rohrleitungen durch Hochspannungsanlagen</b>	<b>471</b>
	H.-U. PAUL und H.-G. SCHÖNEICH	
23.1	Kapazitive Beeinflussung	472
23.2	Ohmsche Beeinflussung	473

23.2.1	Berührung unter Spannung stehender Leiter . . . . .	473
23.2.2	Spannungstrichter von Mastern . . . . .	474
23.3	Induktive Beeinflussung . . . . .	476
23.3.1	Ursachen und Einflußgrößen . . . . .	476
23.3.2	Berechnung der Rohrleitungspotentiale bei Parallelführung von Hochspannung-Leitung und Rohrleitung . . . . .	477
23.3.3	Vollständige Näherung mit schrägen Abschnitten . . . . .	481
23.3.4	Vereinfachte Berechnungsmethoden . . . . .	482
23.3.4.1	Beeinflussung durch Erdkurzschlußströme und durch Fahrleitungsströme . . . . .	482
23.3.4.2	Beeinflussung im Normalbetrieb von Drehstrom-Freileitungen . . . . .	482
23.3.5	Darstellung der Rohrleitungskenngrößen . . . . .	485
23.4	Grenzlängen und Grenzabstände . . . . .	487
23.4.1	Zulässige Berührungsspannungen . . . . .	488
23.4.1.1	Kurzzeit-Beeinflussung . . . . .	488
23.4.1.2	Langzeit-Beeinflussung . . . . .	489
23.4.2	Ermitteln der Rohrleitungspotentiale . . . . .	489
23.5	Schutzmaßnahmen gegen unzulässig hohe Rohrleitungspotentiale . . . . .	489
23.5.1	Kurzzeit-Beeinflussung . . . . .	489
23.5.2	Langzeit-Beeinflussung . . . . .	490
23.5.3	Schutzmaßnahme durch Erden . . . . .	490
23.5.4	Erdungsmaßnahmen und kathodischer Schutz . . . . .	491
23.5.4.1	Abgrenzeinheiten bei Kurzzeit-Beeinflussung . . . . .	492
23.5.4.2	Abgrenzeinheiten für Langzeit- und Kurzzeit-Beeinflussung . . . . .	492
23.6	Messung der Rohrleitungspotentiale . . . . .	493
23.6.1	Messung der Kurzzeit-Beeinflussung . . . . .	493
23.6.1.1	Schwebungsmethode . . . . .	493
23.6.1.2	Umpolungsmethode . . . . .	494
23.6.1.3	Digitales Meßverfahren . . . . .	494
23.6.2	Messung der Langzeit-Beeinflussung . . . . .	495
23.6.3	Meßergebnisse von Rohrleitungspotentialen . . . . .	495
23.7	Literatur . . . . .	497
<b>24</b>	<b>Strom- und Spannungsverteilung im stationären elektrischen Feld . . . . .</b>	<b>499</b>
	W. V. BAECKMANN und W. SCHWENK	
24.1	Der Ausbreitungswiderstand von Anoden und Erden . . . . .	499
24.2	Beeinflussungsfaktor bei mehreren Anoden . . . . .	508
24.3	Potentialverteilung an der Erdoberfläche . . . . .	509
24.3.1	Bodenwiderstandsformel . . . . .	509
24.3.2	Anodischer Spannungstrichter . . . . .	510

XXII	Inhalt	
24.3.3	Kathodischer Spannungstrichter im Zylinderfeld . . . . .	510
24.3.4	Beeinflussung durch den kathodischen Spannungstrichter . . . . .	511
24.4	Berechnung der Strom- und Potentialverteilung . . . . .	512
24.4.1	Allgemeine Beziehungen für ein Zwei-Leiter-Modell . . . . .	512
24.4.2	Berechnung von Erdern mit Längswiderständen . . . . .	513
24.4.3	Schutzbereich einer Rohrleitung bei kathodischem Korrosionsschutz und Schutzstrombedarf . . . . .	514
24.4.4	Potentialverteilung bei Überschutz . . . . .	516
24.4.5	Kathodischer Schutz in engen Spalten . . . . .	517
24.4.6	Strom- und Potentialverteilung im Rohrrinneren an Isolierstücken . . . .	518
24.5	Allgemeine Hinweise zur Stromverteilung . . . . .	520
24.6	Literatur . . . . .	521
<b>Register</b>	. . . . .	<b>523</b>

**Anzeigenteil**

# Verzeichnis der Autoren

Dipl.-Phys. W. v. BAECKMANN  
Ulmenstraße 12  
45133 Essen

Dipl.-Ing. U. BETTE  
c/o Technische Akademie Wuppertal  
Postfach 10 04 09  
42004 Wuppertal

Dr.-Ing. C. DÖRNEMANN  
c/o RWE Energie AG  
Kruppstraße 5  
45128 Essen

Dipl.-Ing. D. ENGEL  
c/o Germanischer Lloyd AG  
Postfach 11 16 06  
20416 Hamburg

G. FRANKE  
c/o NORSK HYDRO  
Magnesiumgesellschaft mbH  
Industriestraße 61  
46240 Bottrop

D. FUNK  
c/o Ruhrgas AG  
45177 Essen

Dr.-Ing. J. GEISER  
c/o Ruhrgas AG  
45177 Essen

Ing. C. GEY  
Holzmarkenweg 4  
28757 Bremen

Prof. Dr. Dr. H. GRÄFEN  
Ursulastraße 9  
50129 Bergheim

Dipl. TH. HEIM  
Korrosionstechnik  
Rubensweg 1  
40724 Hilden

Dipl.-Chem. U. HEINZELMANN  
c/o Guldager Elektrolyse GmbH  
Daimler-Straße 13  
45891 Gelsenkirchen

Dipl.-Ing. T. HOFFMANN  
c/o Deutsche Telekom AG  
Zentrale/TN 217  
64307 Darmstadt

Dipl.-Ing. K. HORRAS  
Billrothstraße 6  
42283 Wuppertal

Prof. Dr. B. ISECKE  
c/o Bundesanstalt für Materialforschung  
und Materialprüfung  
Unter den Eichen 87  
12203 Berlin

Dipl.-Ing. B. LEUTNER  
Im Wiesengrund 7  
30880 Laatzen

XXIV Verzeichnis der Autoren

Dr. H.-U. PAUL  
c/o RWE Energie AG  
Kruppstraße 5  
45128 Essen

Ing. F. PAULEKAT  
Hendrik-Witte-Straße 14  
45128 Essen

Dr. B. RICHTER  
c/o Germanischer Lloyd AG  
Postfach 11 16 06  
20416 Hamburg

Dipl.-Ing. G. RIEGER  
Werheide 7  
51427 Bergisch Gladbach

Dr. H.-G. SCHÖNEICH  
c/o Ruhrgas AG  
45177 Essen

Dipl.-Ing. F. SCHWARZBAUER  
c/o Stadtwerke München  
Dachauer Straße 110  
80287 München

Prof. Dr. W. SCHWENK  
Scheffelstraße 26  
47057 Duisburg

Dipl.-Ing. W. VESPER  
c/o Quante AG Telekommunikation  
Uellendahler Straße 353  
42109 Wuppertal

## Verzeichnis häufig benutzter Formelzeichen, Konstanten und Symbole

Zeichen	Bedeutung	Gebräuchliche Maßeinheit
$a$	Abstand, Länge	cm, m
$a$	Annuitätsfaktor	
$b$	Abstand, Länge	cm, m
$b_{+/-}$	Tafelneigung (dekad.-log.)	mV
$B$	Beweglichkeit	$\text{cm}^2 \text{mol}^{-1} \text{s}^{-1}$
$B_{0,1,E}$	Bewertungszahlsumme (Erdbogenaggressivität)	
$c(X_i)$	Konzentration der Stoffart $X_i$	$\text{mol cm}^{-3}$ , $\text{mol L}^{-1}$
$C$	Kapazität	$\text{F} = \Omega^{-1} \text{s}$
$C$	Konstante, allgemein	
$C_D$	Doppelschichtkapazität einer Elektrode	$\mu\text{F cm}^{-2}$
$d$	Abstand, Durchmesser	mm, m
$D_i$	Diffusionskonstante der Stoffart $X_i$	$\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$
$E$	elektrische Feldstärke	$\text{V cm}^{-1}$
$f$	Frequenz	$\text{Hz} = \text{s}^{-1}$
$f_a$	Umrechnungsfaktor	$\text{mm a}^{-1}/(\text{mA cm}^{-2})$
$f_b$	Umrechnungsfaktor	$\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}/(\text{mA cm}^{-2})$
$f_c$	Umrechnungsfaktor	$\text{mm a}^{-1}/(\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1})$
$f_v$	Umrechnungsfaktor	$\text{L m}^{-2} \text{h}^{-1}/(\text{mA cm}^{-2})$
$F$	Kraft	N
$F$	Beeinflussungsfaktor, Faktor	
$F$	relativierter Ausbreitungswiderstand	$\text{cm}^{-1}$ , $\text{m}^{-1}$
$\tilde{F}$	Faraday-Konstante = $96485 \text{ A s mol}^{-1}$ = $26,8 \text{ A h mol}^{-1}$	
$g$	Grenzstromdichte	$\text{A m}^{-2}$
$G$	Grenzstrom	A
$G$	elektrischer Leitwert, Ableitung	$\text{S} = \Omega^{-1}$
$G'$	Ableitungsbelag	$\text{S m}^{-1}$ , $\text{S km}^{-1}$
$\Delta G$	Freie Bildungsenthalpie	$\text{J mol}^{-1}$
$h$	Höhe, Erddeckung	cm, m
$i$	Laufzahl	
$I$	Stromstärke	A

Zeichen	Bedeutung	Gebräuchliche Maßeinheit
$I_s$	Schutzstrombedarf, Schutzstrom	A
$I'$	Strombelag	A km <sup>-1</sup>
$j_H$	H-Permeationsstromdichte	L cm <sup>-2</sup> min <sup>-1</sup>
$j_i$	Transportrate der Stoffart X <sub>i</sub>	mol cm <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup>
$J$	Stromdichte	A m <sup>-2</sup> , mA cm <sup>-2</sup>
$J_{akt}$	Aktivierungsstromdichte	A m <sup>-2</sup> , mA cm <sup>-2</sup>
$J_{max}$	maximale Stromdichte einer galvanischen Anode	A m <sup>-2</sup> , mA cm <sup>-2</sup>
$J_{pas}, J_p$	Passivierungsstromdichte	A m <sup>-2</sup> , mA cm <sup>-2</sup>
$J_s$	Schutzstromdichte, Mindestschutzstromdichte	A m <sup>-2</sup> , mA cm <sup>-2</sup>
$J_o$	Austauschstromdichte	A m <sup>-2</sup> , mA cm <sup>-2</sup>
$k$	Polarisationsparameter	cm, m
$k$	spezifische Kosten	DM/Einheit
$K$	Spannungsintensität	N mm <sup>-3/2</sup>
$K$	Gleichgewichtskonstante	(mol L <sup>-1</sup> ) <sup>(Σ<i>n<sub>i</sub></i>)</sup>
$K$	Kosten	DM
$K_{S,x}$	Säurekapazität bis pH <i>x</i>	mol L <sup>-1</sup>
$K_{B,x}$	Basekapazität bis pH <i>x</i>	mol L <sup>-1</sup>
$K_w$	Ionenprodukt des Wassers bei 25 °C = 10 <sup>-14</sup> mol <sup>2</sup> L <sup>-2</sup>	
$K_w$	Reaktionskonstante bei Sauerstoffkorrosion	mm
$l$	Länge, Abstand	cm, m, km
$l_i$	Ionenäquivalentleitfähigkeit der Stoffart X <sub>i</sub> (nicht verwechseln mit $\Lambda_i$ oder $u_i$ )	S cm <sup>2</sup> mol <sup>-1</sup>
$l_k$	charakteristische Länge, Kennlänge eines Erders oder Rohrleitungsabschnittes, siehe auch $L_c$	m, km
$L$	Länge eines betrachteten Leitungs- oder Streckenabschnittes	km
$L$	charakteristische Länge einer Fehlstelle, Meßprobe (Erder) – (nicht verwechseln mit $L_c$ )	cm, m
$L$	Schutzbereichlänge einer Rohrleitung	km
$L$	Induktivität	H = Ω s
$L_c$	charakteristische Länge, Kennlänge eines Streckenabschnittes (synonym mit $l_k$ )	m, km
$L_{Gr}$	Grenzlänge	m, km
$m$	Masse	g, kg
$m'$	längenbezogene Rohrmasse	kg m <sup>-1</sup>
$M$	Atom-, Molmasse	g mol <sup>-1</sup>
$M'$	Gegeninduktivitätsbelag	H km <sup>-1</sup>
$n$	Anzahl, Laufzahl	

Zeichen	Bedeutung	Gebräuchliche Maßeinheit
$n'$	längenbezogene Anzahl	$m^{-1}$ , $km^{-1}$
$n_i$	stöchiometrischer Koeffizient, Ladungszahl der Stoffart $X_i$	
$N$	Fehlstellendichte	$m^{-2}$
$N$	reziproke Neigung von $\ln J $ – U-Kurven	mV
$p$	Druck, Gasdruck	bar
$p(X_i)$	Partialdruck der Stoffart $X_i$	bar
$P$	Permeationskoeffizient	$cm^2 s^{-1} bar^{-1}$ , $g cm^{-1} h^{-1} bar^{-1}$
$Q$	elektrische Ladung	A s, A h
$Q'$	Strominhalt galvanischer Anoden, massenbezogener	A h $kg^{-1}$
$Q''$	Strominhalt galvanischer Anoden, volumenbezogener	A h $dm^{-3}$
$r$	Radius, Abstand	cm, m
$r$	Reduktionsfaktor	
$r_p$	spezifischer Polarisationswiderstand	$\Omega m^2$
$r_u$	spezifischer Umhüllungswiderstand	$\Omega m^2$
$R$	elektrischer Widerstand, Ausbreitungswiderstand	$\Omega$
$R$	Gaskonstante = $8,31 J mol^{-1} K^{-1}$	
$R'$	Widerstandsbelag	$\Omega m^{-1}$ , $\Omega km^{-1}$
$R_m$	Zugfestigkeit	N $mm^{-2}$
$R_p$	Polarisationswiderstand	$\Omega$
$R_{p0,2}$	Zugspannung für 0,2% Dehnung	N $mm^{-2}$
$R_u$	Umhüllungswiderstand	$\Omega$
$R_\Omega$	Ohmscher Widerstand bei Polarisation	$\Omega$
$s$	Abstand, Dicke, Dickenabnahme	mm, cm
$S$	Fläche, Querschnitt	$m^2$
$t$	Zeit	s, h, a
$t$	Tiefe	cm, m
$T$	Temperatur	$^{\circ}C$ , K
$u_i$	elektrochemische Beweglichkeit der Stoffart $X_i$	$V^{-1} cm^2 s^{-1}$
$U$	Spannung, Potential	V
$U_{aus}$	Ausschaltpotential	V
$U_B$	Berührungsspannung	V
$U''_B$	Potentialdifferenz zwischen Bezugselektroden parallel über die Rohrleitung	mV, V
$U_B^\perp, \Delta U_x$	Potentialdifferenz zwischen Bezugselektroden senkrecht zur Rohrleitung (Abstand $x$ )	mV, V
$U_{Cu/CuSO_4}$	Potential, bezogen auf Cu/CuSO <sub>4</sub> -Elektrode	mV, V

Zeichen	Bedeutung	Gebräuchliche Maßeinheit
$U_{\text{ein}}$	Einschaltpotential	V
$U_{\text{H}}$	Potential, bezogen auf Standard-Wasserstoffelektrode	mV, V
$U_{\text{IR}}$	Ohmscher Spannungsabfall	V
$U_{\text{IR-frei}}$	IR-freies Potential	V
$U_{\text{R}}$	Ruhepotential	V
$U_{\text{s}}$	Schutzpotential	V
$U_{\text{T}}$	Treibspannung	V
$U_{\text{um}}$	Umschaltpotential	V
$U_{\text{o}}$	Leerlaufspannung (EMK)	V
$v, v_{\text{int}}$	flächenbezogene Massenverluste bzw. integraler Wert	$\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$
$V$	Volumen	$\text{cm}^3, \text{dm}^3, \text{L}$
$\mathcal{V}$	Atom-, Molvolumen	$\text{m}^3 \text{mol}^{-1}, \text{L mol}^{-1}$
$W$	Wagner-Zahl	
$w, w_{\text{int}}$	Abtragungsgeschwindigkeit bzw. integraler Wert	$\mu\text{m a}^{-1}, \text{mm a}^{-1}$
$w$	Wirkungsgrad	(%)
$w$	Windungszahl	
$w, w_{\text{int}}$	Abtragsrate bzw. integraler Wert	$\text{mm a}^{-1}$
$w_i$	Geschwindigkeit der Stoffart $X_i$	$\text{cm s}^{-1}$
$x$	Ortskoordinate	m, km
$Y'$	Admittanzbelag	$\text{S km}^{-1}$
$z_i$	Ladungszahl der Stoffart $X_i$	
$Z$	Impedanz	$\Omega$
$Z$	Wellenwiderstand	$\Omega$
$Z_i$	Bewertungszahl (Bodenaggressivität)	
$\alpha$	Symmetriefaktor, Durchtrittsfaktor	
$\alpha$	Wegkonstante (Gleichstrom)	$\text{km}^{-1}$
$\alpha$	Stromausbeutefaktor bei galvanischen Anoden und bei Wechselstromkorrosion	in %
$\alpha$	Geometriefaktor einer Fehlstelle, Meßprobe (Erder)	–
$\beta$	Achsenverhältnis einer Fehlstelle, Meßprobe (Erder)	–
$\beta_{+/-}$	Tafel-Neigung (nat.-log.)	mV
$\gamma$	Übertragungsmaß	$\text{km}^{-1}$
$\delta$	Diffusionsschichtdicke	cm
$\epsilon, \epsilon_{\text{r}}$	Dielektrizitätskonstante, relative elektrische Feldkonstante	
$\epsilon_{\text{o}}$	$= 8,85 \cdot 10^{-14} \text{ F cm}^{-1}$	