

Inhaltsverzeichnis

1	Wirtschaftliche und technische Aspekte der Korrosion	17
1.1	Qualitätssicherung durch Korrosionsschutz	17
1.2	Bauteilsicherheit und Korrosionsschutz	17
1.3	Korrosionsschutz ist aktiver Umweltschutz	18
1.4	Korrosionsschutz und Wirtschaftlichkeit	19
1.5	Tendenzen der Zukunft	20
1.5.1	Neue Technologien – neue Korrosionsprobleme	20
1.5.2	Probleme der Praxis und Bedarf an Technologietransfer	21
1.6	Begriffe der Korrosion	22
1.6.1	Verschleiß und Korrosion	22
1.6.2	Korrosionsschaden und Korrosionsschutz	23
1.6.3	Das Korrosionssystem	24
1.6.4	Korrosionsarten	26
1.6.4.1	Äußere Korrosion	26
1.6.4.2	Innere Korrosion	26
1.6.5	Reaktionsarten	27
1.6.5.1	Elektrochemische Korrosion	27
1.6.5.2	Chemische Korrosion	28
1.6.5.3	Metallphysikalische Korrosion	28
1.6.6	Korrosionsgeschwindigkeiten	28
2	Elektrochemie der Metallkorrosion	29
2.1	Energetische Betrachtung der Metallkorrosion	30
2.1.1	Der Vorgang der Metallauflösung	31
2.1.2	Die Elektrode	34
2.1.3	Energieänderung als Ursache von Elektrodenreaktionen	34
2.1.4	Bezeichnung verschiedener Elektrodenarten	35

2.1.5	Ursache von Korrosionsreaktionen.....	38
2.1.6	Korrosion in wässrigen Elektrolyten	39
2.1.7	Anodische und kathodische Teilreaktionen bei der Korrosion	40
2.1.8	Potential-pH-Diagramme.....	41
2.1.9	Potential-pH-Diagramm für Eisen.....	44
2.1.10	Potential-pH-Diagramme für einige technisch wichtige Metalle	47
2.1.11	Anwendung der pH-Potentialdiagramme bei Korrosionsschäden	50
2.1.12	Grenzen der energetischen Betrachtungsweise.....	53
2.2	Kinetische Betrachtung der Metallkorrosion	53
2.2.1	Chemische und elektrochemische Reaktionsgeschwindigkeit	54
2.2.2	Durchtrittsüberspannung	56
2.2.3	Polarisationsdiagramme von Mischelektroden.....	57
2.2.4	Diffusionspolarisation.....	58
2.2.5	Austauschstromdichte.....	61
2.3	Zusammenfassung.....	64
3	Metallauflösung.....	66
3.1	Das Strom-Potential-Diagramm von Eisen in Wasser.....	66
3.2	Aktive Metallauflösung.....	68
3.2.1	Kristallografischer Abtrag und Grübchenbildung.....	69
3.2.2	Ebene Abtragung und Poliereffekt.....	69
3.2.3	Gleichförmiger Korrosionsabtrag.....	70
3.3	Bildung von schützenden Schichten auf Metallen	71
3.3.1	Der Passivzustand.....	72
3.3.2	Korrosion bei Deckschichtbildung	75
4	Korrosionsarten in wässrigen Medien	78
4.1	Systematik der Korrosion.....	78
4.2	Gleichmäßige Flächenkorrosion	79
4.2.1	Atmosphärische Korrosion.....	79
4.2.1.1	Atmosphärische Korrosion von Eisen und Stahl	80
4.2.1.2	Einflussfaktoren bei der atmosphärischen Korrosion	81
4.2.1.3	Atmosphärische Korrosion von Nichteisenmetallen.....	83
4.2.2	Korrosion in Wasser.....	84
4.2.2.1	Korrosion durch Säuren	86

4.2.2.2	Korrosion in neutralen Lösungen: Sauerstoffkorrosion.....	87
4.2.2.3	Einfluss der Temperatur	87
4.2.2.4	Einfluss von Deckschichten	89
4.2.2.5	Einfluss des Salzgehaltes auf Korrosionsreaktionen.....	89
4.2.2.6	Hydrolyse von Salzen	92
4.3	Örtliche Korrosion durch Konzentrationselemente.....	93
4.3.1	Muldenkorrosion	94
4.3.1.1	Muldenkorrosion an unlegierten und niedrig- legierten Stählen	95
4.3.2	Lochkorrosion.....	97
4.3.2.1	Mechanismus der Lochkorrosion.....	99
4.3.2.2	Lochfraß bei chemisch beständigen Stählen.....	100
4.3.2.3	Lochfraß bei Kupfer.....	100
4.3.2.4	Lochfraß bei Aluminiumwerkstoffen	101
4.3.2.5	Allgemeine Maßnahmen zur Vermeidung von Lochfraß.....	103
4.3.3	Spaltkorrosion und Korrosion unter Ablagerungen.....	104
4.3.3.1	Spaltkorrosion bei nichtrostenden Stählen.....	105
4.3.3.2	Spaltkorrosion bei Aluminiumlegierungen.....	106
4.3.3.3	Maßnahmen zur Vermeidung von Spaltkorrosion.....	107
4.4	Kontaktkorrosion.....	107
4.4.1	Einfluss der kathodischen Polarisierung auf den Elementstrom bei Kontaktkorrosion	111
4.4.2	Konstruktive und fertigungstechnische Schutzmaßnahmen	112
4.5	Selektive Korrosion.....	113
4.5.1	Entzinkung.....	114
4.5.2	Spongiöse.....	115
4.5.3	Interkristalline Korrosion	117
4.5.3.1	Interkristalline Korrosion bei austenitischen Chrom- Nickel-Stählen	118
4.5.3.2	Interkristalline Korrosion bei Aluminiumwerkstoffen.....	121
4.6	Mikrobiologisch induzierte Korrosion.....	122
4.6.1	Übersicht.....	122
4.6.2	Mikrobiologische Voraussetzungen	123
4.6.3	Korrosion unter Biofilmen.....	123
4.6.4	Maßnahmen zur Vermeidung mikrobiologisch ver- ursachter Korrosion	124

5	Korrosionsarten mit mechanischer Beanspruchung	126
5.1	Korrosion unter positiven Normalspannungen und Dehnungen	127
5.2	Erscheinungsformen der Spannungsrisskorrosion (SpRK).....	128
5.2.1	Metallinduzierte Spannungsrisskorrosion	129
5.2.1.1	Quecksilbersprödung	130
5.2.2.2	Lotbrüchigkeit.....	130
5.2.2.3	Rissbildung durch Cadmium, Zink und andere Metalle.....	131
5.2.1.4	Einfluss von Sorptionsschichten: Rehbinder-Effekt	132
5.2.2	Spannungsrisskorrosion durch wässrige Elektrolyte	135
5.2.2.1	Mechanismen der Spannungsrisskorrosion	135
5.2.2.2	Anodische Spannungsrisskorrosion.....	135
5.2.2.3	Wasserstoffunterstützte Spannungsrisskorrosion.....	138
5.2.3	Spannungsrisskorrosion von Stählen	139
5.2.3.1	Interkristalline Spannungsrisskorrosion unlegierter Stähle ...	139
5.2.3.2	Interkristalline Spannungsrisskorrosion sensibilisierter Chromstähle	144
5.2.3.3	Transkristalline Spannungsrisskorrosion austenitischer Chrom-Nickel-Stähle	144
5.2.4	Spannungsrisskorrosion von Kupfer und Kupferlegierungen.....	147
5.2.4.1	Ammoniakinduzierte Spannungsrisskorrosion.....	147
5.2.4.2	Nitritinduzierte Spannungsrisskorrosion	149
5.2.5	Spannungsrisskorrosion bei Aluminium-Werkstoffen.....	149
5.2.5.1	Spannungsrisskorrosion bei zink- und magnesium- haltigen Aluminiumlegierungen	149
5.2.5.2	Spannungsrisskorrosion von lithiumhaltigen Aluminium- legierungen.....	151
5.2.6	Spannungsrisskorrosion von Titanlegierungen.....	152
5.3	Wasserstoffinduzierte Korrosion metallischer Werkstoffe	152
5.3.1	Metallphysikalische Vorgänge	153
5.3.2	Chemische Reaktionen	153
5.3.3	Elektrochemische Reaktionen	154
5.3.4	Teilschritte der wasserstoffinduzierten Korrosion	154
5.3.5	Metallphysikalische Effekte der wasserstoffinduzierten Korrosion	156
5.3.5.1	Reaktionen von absorbiertem Wasserstoff im Metall	156
5.3.5.2	Blasenbildung	156

5.3.5.3	Wasserstoffinduzierte Risskorrosion und Spannungsrisskorrosion	157
5.3.5.4	Wasserstoffinduzierte Risskorrosion.....	157
5.3.5.5	Wasserstoffinduzierte Spannungsrisskorrosion	158
5.3.6	Einflüsse von Werkstoff, Medium und mechanischer Beanspruchung	160
5.3.7	Wasserstoffinduzierte Korrosion bei Nichteisenmetallen.....	162
5.4	Korrosion bei dynamischer Beanspruchung	163
5.4.1	Schwingungsrisskorrosion (SwRK)	163
5.4.1.1	Mechanismus und Erscheinungsform.....	164
5.4.1.2	Einflussgrößen	165
5.4.1.3	Schutz gegen Schwingungsrisskorrosion.....	166
5.4.2	Dehnungsinduzierte Risskorrosion.....	167
5.4.2.1	Mechanismus	167
5.5	Reibkorrosion.....	169
5.5.1	Reibkorrosion bei Trockenreibung	169
5.5.2	Reibkorrosion und Reibdauerbruch.....	170
5.5.3	Reibkorrosion bei Schmierreibung.....	172
5.5.4	Häufige Schäden und Gegenmaßnahmen	173
5.6	Korrosion in strömenden Flüssigkeiten.....	174
5.6.1	Erosionskorrosion und Kavitationskorrosion	175
5.6.2	Einfluss der Strömungsgeschwindigkeit.....	176
5.6.3	Erosionskorrosion.....	177
5.6.3.1	Konstruktive und fertigungstechnische Maßnahmen.....	178
5.6.4	Kavitationskorrosion	178
5.6.5	Tropfenschlag	180
6	Korrosion bei hohen Temperaturen	182
6.1	Übersicht	182
6.2	Thermodynamik der Hochtemperaturkorrosion.....	184
6.3	Kinetik der Hochtemperaturkorrosion	185
6.3.1	Einfluss der Diffusion und Mechanismus des Schichtwachstums	186
6.3.2	Einfluss der Phasengrenzreaktionen auf die Schichtbildung	188
6.3.3	Einfluss mechanischer Spannungen auf schützende Deckschichten....	190
6.4	Hochtemperaturbeständige Werkstoffe	191
6.5	Einfluss der Gasatmosphäre auf die Deckschichtbeständigkeit	192

6.6	Korrosion unter Ablagerungen und in Salzschnmelzen	193
6.7	Besondere Formen der Hochtemperaturkorrosion	194
6.7.1	Innere Oxidation	194
6.7.2	Aufkohlung	194
6.7.3	Wasserstoffangriff	196
6.7.4	Korrosion durch Taupunktunterschreitung	196
6.8	Schutzschichten für Hochtemperaturanwendungen	197
7	Möglichkeiten des Korrosionsschutzes	198
7.1	Übersicht	198
7.2	Zugriff und Auswertung von Korrosionsdaten	199
7.3	Korrosionsschutzgerechte Konstruktion	200
7.4	Korrosionsschutzgerechte Werkstoffwahl	205
7.4.1	Werkstofftyp und Werkstoffzusammensetzung	205
7.4.1.1	Nichtrostende Stähle	205
7.4.1.2	Sonderwerkstoffe für den Korrosionsschutz	208
7.4.2	Fertigungstechnische Einflüsse	210
7.5	Oberflächenbehandlung	211
7.5.1	Oberflächenbearbeitung	211
7.6	Korrosionsschutz durch metallische Überzüge	213
7.6.1	Überzüge durch Schmelztauchen	214
7.6.1.1	Feuerverzinken	214
7.6.1.2	Schmelztauchaluminieren	218
7.6.2	Überzüge durch thermisches Spritzen	218
7.6.3	Diffusionsüberzüge	219
7.7	Metallüberzüge durch Plattieren	223
7.8	Ursache eines Spannungsrissbruches auf Grund fehlerhafter Konstruktion	224
7.9	Instandhaltung und Qualitätssicherung als vorbeugender Korrosionsschutz ...	225
8	Passiver Korrosionsschutz	230
8.1	Übersicht	230
8.2	Korrosionsschutz durch anorganische Schichten	230
8.2.1	Anorganische Lacke	231
8.2.2	Korrosionsschutz von Aluminiumwerkstoffen	232
8.2.2.1	Chemische Oxidation von Aluminiumwerkstoffen	232
8.2.2.2	Anodische Oxidation von Aluminiumwerkstoffen	232

8.2.2.3	Oxidschichtbildung	232
8.2.2.4	Anodisierverfahren	233
8.2.2.5	Hartanodisierverfahren	233
8.2.3	Korrosionsschutz von Magnesiumwerkstoffen.....	234
8.3	Chromatieren von Metallen und Überzügen	234
8.3.1	Anwendung und Verfahren	234
8.3.2	Korrosionsschutzwirkung von Chromatierschichten.....	235
8.4	Phosphatieren	238
8.4.1	Anwendung und Verfahren	238
8.4.2	Korrosionsschutzwirkung von Phosphatierschichten	238
8.5	Korrosionsschutz durch organische Beschichtungen	239
8.5.1	Übersicht.....	239
8.5.2	Beschichtungssysteme, Funktionen und Aufbau	240
8.5.3	Vorbereitung der Werkstoffoberfläche	243
8.5.4	Korrosion von beschichteten Werkstoffen	244
8.5.4.1	Stofftransport durch Beschichtungen und Wasser- absorption	245
8.5.4.2	Haftfestigkeit von Beschichtungen	247
8.5.4.3	Korrosion unter intakten Beschichtungen.....	248
8.5.4.4	Korrosion an schadhafte Beschichtungen.....	252
8.5.4.5	Bedeutung der Alkaliionen bei der Korrosion unter Beschichtungen.....	254
8.5.4.6	Filigrankorrosion	256
8.5.5	Korrosionsschutz durch dünne Haftsichten	257
8.6	Korrosionsschutz durch galvanische Überzüge	259
8.6.1	Übersicht.....	259
8.6.2	Anodische und kathodische Überzüge.....	259
8.6.3	Überzüge mit kathodischer Schutzwirkung auf den Grundwerkstoff....	263
8.6.3.1	Zinküberzüge	263
8.6.3.2	Zinklegierungsüberzüge.....	264
8.6.4	Überzüge mit anodischer Wirkung zum Grundmetall	265
8.6.4.1	Chromüberzüge.....	266
8.6.4.2	Galvanische Nickelüberzüge.....	270
8.6.4.3	Chemische Nickelüberzüge	272
8.6.5	Überzug und Korrosionsbeständigkeit	274
8.6.5.1	Einfluss der Dickenverteilung eines Überzugs.....	276

8.6.5.2	Einfluss der Überzugfestigkeit	276
8.6.5.3	Einfluss des Grundwerkstoffs auf die Korrosions- beständigkeit	279
8.6.6	Korrosionsbeanspruchung und Überzugssysteme	282
9	Aktiver Korrosionsschutz	284
9.1	Korrosionsschutz durch Beeinflussung des Mediums.....	284
9.1.1	Entfernung korrosionsfördernder Stoffe aus dem Medium	284
9.1.2	Entgasung und Deaktivierung.....	285
9.1.3	Behandlung der umgebenden Atmosphäre	285
9.2	Korrosionsschutz durch Inhibitoren	286
9.2.1	Übersicht.....	286
9.2.2	Wirkung von Inhibitoren aus elektrochemischer Sicht.....	286
9.2.3	Klassifizierung der Inhibitoren	288
9.2.4	Wasser und Sauerstoff können die Inhibition unterstützen.....	289
9.2.5	Inhibition von aktiven Metalloberflächen.....	291
9.2.6	Inhibition bei oxid- oder hydroxidbedeckten Metalloberflächen.....	293
9.2.7	Auflösung und Stabilisierung von Inhibitorfilmen und Deckschichten	295
9.2.8	Anwendungsgebiete für Inhibitoren	297
9.2.8.1	Beizinhibitoren.....	298
9.2.8.2	Inhibitoren der Säurekorrosion	298
9.2.8.3	Dampfphaseninhibitoren.....	299
9.2.8.4	Inhibitoren für Kühlwasser	300
9.2.8.5	Inhibition in Gebäude- und Fernheizungen.....	304
9.2.8.6	Inhibition in Wärmeübertragungsmedien von Solar- anlagen	304
9.2.8.7	Korrosion und Inhibition in Trinkwasserrohren.....	304
9.2.8.8	Anwendung von Inhibitoren in der Petroindustrie	306
9.3	Elektrochemischer Korrosionsschutz.....	308
9.3.1	Übersicht.....	308
9.3.2	Kathodischer Korrosionsschutz.....	308
9.3.2.1	Galvanische Anoden und Fremdstrom.....	308
9.3.3	Anodischer Korrosionsschutz.....	311
9.3.4	Innenschutz von wasserführenden Anlagen.....	311

10 Wasser als Korrosionsmedium	314
10.1 Wasserhärte und Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht	314
10.2 Einfluss von gelösten Sauerstoff im Wasser	315
10.3 Warmes und heißes Wasser	318
10.4 Kühlkreisläufe	318
10.5 Methoden der Härtestabilisierung.....	319
10.6 Vermeidung von Korrosion in Anlagen mit niedriglegiertem Stahl.....	319
10.7 Wirkung von Salzanionen auf die Korrosion von Stahl	320
10.8 Kühlwasserbehandlung durch Chemikalien	321
11 Korrosionsprüfungen und Qualitätssicherung	322
11.1 Übersicht	322
11.2 Werkstoffdaten und Prüfmethode.....	322
11.3 Korrosionsuntersuchungen.....	323
11.3.1 Korrosionsprüfungen	324
11.3.2 Untersuchungsbedingungen.....	324
11.3.3 Untersuchungsverfahren und Messtechnik.....	324
11.3.4 Untersuchungsmethoden	325
11.3.4.1 Einflussgrößen der Korrosion	326
11.3.4.2 Werkstoffe und Bauteile.....	326
11.3.4.3 Untersuchungsmedien.....	326
11.3.4.4 Betriebsbedingungen	327
11.4 Chemische Korrosionsuntersuchungen	327
11.5 Elektrochemische Korrosionsuntersuchungen	328
11.5.1 Korrosionsuntersuchungen ohne äußere Stromquelle	328
11.5.1.1 Potentialmessungen (Freies Korrosionspotential).....	328
11.5.1.2 Messung des Elementstroms.....	329
11.5.2 Korrosionsuntersuchungen mit äußerer Stromquelle (Polarisationsmessungen)	329
11.5.2.1 Stromdichte-Potential-Kurven	330
11.5.2.2 Potentiodynamische Messung.....	330
11.5.2.3 Extrapolation von Tafel-Geraden	331
11.5.2.4 Polarisationswiderstandsmessung.....	332
11.5.3 Elektrochemische Impedanzspektrometrie (EIS).....	332
11.6 Korrosionsprüfungen von Beschichtungen und Überzügen.....	333
11.6.1 Praxisnahe Korrosionsbelastungen.....	333
11.6.2 Prüfung von Beschichtungen	335

11.6.3	Prüfung von galvanischen Überzügen	335
11.6.4	Wahl einer geeigneten Prüfmethode	335
11.7	Verfahren zur Prüfung mechanischer Einflussgrößen.....	336
11.7.1	Prüfung auf Spannungsrisskorrosion.....	336
11.7.2	Prüfung auf Schwingungsrisskorrosion.....	338
11.8	Methoden der statistischen Versuchsplanung.....	339
11.8.1	Anwendung statistischer Methoden zur Qualitätssicherung.....	339
11.8.2	Statistik als Mittel zur Darstellung von Gesetzmäßigkeiten.....	340
11.8.3	Statistische Prüfung von Abhängigkeiten und Unterschieden bei ermittelten Versuchswerten	340
11.8.4	Ausgewählte statistische Verfahren für kleine Stichprobenumfänge ...	341
11.8.5	Anwendung multivariater statistischer Methoden bei großen Serien in der Korrosionsprüfung.....	343
Anhang	345
Stichwortverzeichnis	350
Inserentenverzeichnis	355