

Inhaltsverzeichnis

Kapitel 1

	Verfahren und Systeme der Wasserkühlung	1
1.1	Übersicht	2
1.2	Einteilung der Kühlsysteme nach dem Kühlverfahren	2
1.2.1	Durchlaufkühlung	3
	a) Grundwasser (Brunnenwasser)	4
	b) Oberflächenwasser mit Süßwasserqualität	5
	c) Brackwasser (Flußmündungswasser)	8
	d) Meerwasser	14
1.2.2	Ablaufkühlung	20
1.2.3	Kreislauf-Naßkühlung	20
1.2.4	Kreislauf-Trockenkühlung	32
1.2.5	Kreislauf-Hybridkühlung	35
	a) Geschlossene Kühltürme	36
	b) Kombinierte Naß-/Trockenkühltürme	36
1.3	Einteilung der Kühlsysteme nach industrieller Anwendung	38
1.3.1	Kraftwerke	39
	a) Dampfturbinenkondensatoren	44
	b) Turbogeneratoren	46
	c) Besonderheiten in Kernkraftwerken	48
1.3.2	Chemische Industrie	49
	a) Wärmeaustauscher: Werkstoffe und Konstruktion	49
	b) Kühlwasserverschmutzung	51
1.3.3	Stahlwerke	52
	a) Hochofenwerke (Gruppe 1.3.3)	52
	b) Walzwerke (Gruppe 1.3.4).....	55

Kapitel 2

	Kühlwasserbedingte Probleme und Störmöglichkeiten	57
2.1	Vorbemerkungen	58
2.2	Korrosion	59
2.2.1	Korrosion metallischer Werkstoffe	59
	a) Angriff auf metallische Werkstoffe bei Kühlung mit Brackwasser	65
	b) Angriff auf metallische Werkstoffe bei Kühlung mit Meerwasser	68
2.2.2	Betonangriff durch Wasser und Gegenmaßnahmen	74
2.2.3	Angriff auf Holz	80
	a) Mikrobiologischer Holzabbau	80
	b) Chemischer Holzangriff	82

2.2.4	Angriff auf Asbestzement	85
2.2.5	Angriff auf Kunststoffe	86
2.3	Verschmutzungsarten	87
2.3.1	Sedimentationsverschmutzung	90
2.3.2	Kristallisationsverschmutzung	92
2.3.3	Verschmutzung durch chemische Reaktion	97
2.3.4	Korrosionsverschmutzung	98
2.3.5	Biologisches Wachstum	98
	a) Algenwachstum	99
	b) schleimbildende Bakterien	101
	c) korrosive Bakterien	102
2.4	Ungünstige Beeinflussung des pH-Wertes	104
2.4.1	Beeinflussung des pH-Wertes durch den SO ₂ -Gehalt der Luft	104
2.4.2	Mikrobielle Säurebildung im Kühlwasser	109
2.4.3	Einstellung des pH-Wertes im Gleichgewicht mit dem CO ₂ -Gehalt der Luft	110

Kapitel 3

	Aufbereitung von Zusatzwasser und Kühlwasser	113
3.1	Wasserzusammensetzung	114
3.1.1	Hydrologische Gesichtspunkte	114
3.1.2	Wasserchemische Gesichtspunkte	116
3.1.3	Hydrobiologische Gesichtspunkte	119
3.2	Wasseranalyse zur Auslegung einer Zusatzwasser-Aufbereitungsanlage ..	122
3.3	Beurteilung der Wasseranalyse und Planung der Zusatzwasser-Aufbereitungsanlage	124
3.3.1	Karbonathärte	124
3.3.2	Chloridionengehalt	126
3.3.3	Schwefelwasserstoff, Sulfide	129
3.3.4	Möglichkeiten von Gipsausscheidungen	130
3.3.5	Trübstoffe und kolloid gelöste Stoffe	131
3.3.6	Mikroorganismen	132
3.4	Vorreinigungsverfahren	133
3.4.1	Mechanische Reinigung	133
	a) Absatzbecken	133
	b) Einlaufbauwerke	137
3.4.2	Flockung	138
3.4.2.1	Die Bedeutung des Zeta-Potentials für die Flockung	140
3.4.2.2	Art der Schwebstoffe	144
3.4.2.3	Chemische Reaktionen bei der Flockung	145
	a) Flockung mit Eisen (III)-Salzen	146
	b) Flockung mit Aluminiumsalzen	149

3.4.2.4	Flockungshilfsmittel	152
	a) Aktivierte Kieselsäure	152
	b) Organische Polyelektrolyte	154
3.4.2.5	Flockung von Huminsäuren und Farbkolloiden	159
3.4.2.6	Flockung von Mikroorganismen	160
3.4.2.7	Flockungswirkung und Störmöglichkeiten	161
3.4.2.8	Verfahrenstechnik der Flockung	163
3.4.3	Kiesfiltration	166
3.4.3.1	Theorie der Strömung von Wasser durch Sandschichten	166
3.4.3.2	Vorgänge bei der Trübstoffentfernung aus dem Wasser	170
3.4.3.3	Filterbauarten und Funktionselemente	173
3.4.3.4	Betrieb von Kiesfiltern	174
3.4.3.5	Sonderformen der Filtration	177
3.4.3.6	Teilstromfiltration	181
	a) Teilstromfiltration bei trübstofffreiem Zusatzwasser	182
	b) Teilstromfiltration bei trübem Zusatzwasser	184
3.5	Automatische Kondensatorreinigung	184
	a) Schwammgummikugelfahren	185
	b) Kunststoffbürstenverfahren	185
3.6	Entkarbonisierungsverfahren	188
3.6.1	Schnellentkarbonisierungsverfahren	188
3.6.1.1	Verfahrenstechnik der Schnellentkarbonisierung	189
3.6.1.2	Vorgänge im Schnellreaktor	194
3.6.1.3	Entkarbonisierungseffekt	195
3.6.1.4	Kalkhydratdosierung	199
3.6.2	Langsamfällentkarbonisierung	200
3.6.3	Entkarbonisierung mit Ionenaustauschanlagen	202
3.6.3.1	Anwendungsgebiete für Ionenaustauschanlagen	202
3.6.3.2	Verfahrensbeschreibung	202
3.6.3.3	Austauschkapazität der schwach sauren Ionenaustauschmassen	204
3.6.3.4	Verrieseln der freien Kohlensäure	208
3.6.4	Entsäuerungsverfahren für Durchlaufkühlwasser	208
3.6.5	Säureimpfung	210
3.6.5.1	Die Pufferkapazität von Kühlwasser bei der Säureimpfung	210
3.6.5.2	Säureimpfung zur Verminderung der Karbonathärte	214
	a) Gesichtspunkte zur Wahl einer Säureimpfung	215
	b) Berechnung der Säuremenge und der zulässigen Eindickung	216
3.6.5.3	pH-Werteinstellung	217
	a) Allgemeine Gesichtspunkte	217
	b) Wahl einer Anlage zur Einstellung eines bestimmten pH-Bereiches	218
3.6.6	Physikalische Methoden zur Verminderung des Karbonateinflusses auf Kühlwassersysteme	219
3.7	Rekarbonisierung des Kühlwassers	220
3.8	Aufbereitung von Abwasser zu Kühlturmsatzwasser	223

Kapitel 4

	Kühlwasserbehandlungsverfahren	229
4-1	Biozidbehandlung zur Bekämpfung von Mikroorganismen	230
4.1.1	Chlor	231
4.1.1.1	Mikrozyme Wirkung des Chlors	231
4.1.1.2	Chemisches Verhalten von Chlor und Chloraminen	231
4.1.1.3	Reaktion des Chlors mit Bestandteilen des Wassers	235
4.1.1.4	Methoden der Chlorung	236
	a) Chlorung von Brackwasser	239
	b) Chlorung von Meerwasser	240
4.1.2	Verfahren zur Vermeidung biologischer Verschmutzung bei Meerwasser- kühlung	242
4.1.2.1	Intermittierende Erwärmung	242
4.1.2.2	Temperatureinfluß auf die Korrosion durch Meerwasser	245
4.1.2.3	Sonstige Verfahren	246
4.1.3	Acrolein	247
4.1.4	Kupfersulfat	248
4.1.5	Chlorphenole	250
4.1.6	Organische Verbindungen	251
	a) Organische Stickstoffverbindungen	251
	b) Organische Schwefelverbindungen	251
	c) Organische Bromverbindungen	252
4.1.7	Bekämpfung von Algen und Bakterien	253
4.1.7.1	Bekämpfung von Algen	253
4.1.7.2	Bekämpfung schleimbildender Bakterien	257
4.1.7.3	Bekämpfung sulfatreduzierender Bakterien	259
4.2	Kühlwasserbehandlung zur Vermeidung von Verschmutzung und Ver- krustung der Wärmeübertragungsflächen	261
4.2.1	Dispergiermittel	262
4.2.1.1	Ligninderivate	263
4.2.1.2	Synthetische Dispergiermittel	264
4.2.1.3	Bewertung der Dispergiermittel	264
4.2.2	Härtestabilisatoren	267
4.2.2.1	Bildung und Wirkung der kondensierten Phosphate	267
4.2.2.2	Hydrolyse der Polyphosphate	268
4.2.2.3	Phosphatzehrung im Kühlwasser	270
4.2.2.4	Hinweise für die Polyphosphatdosierung	273
4.2.2.5	Härtestabilisierung mit organischen Stoffen, zum Teil im Gemisch mit Polyphosphaten	275
4.2.2.6	Härtestabilisierung mit Phosphonsäuren und Phosphatestern	276

a) Vorgang der Härtestabilisierung	277
b) Stabilisierungswirkung	278
c) Stabilität der Phosphonsäuren	279
d) Chelatbildung der Phosphonsäuren mit Kupferionen	280
e) Handelsformen der Phosphonsäuren	281
4.2.2.7 Härtestabilisierung mit organischen Polyelektrolyten	281
4.2.2.8 Stabilisierung von Gipshärte	281
4.2.2.9 Härtestabilisierung mittels physikalischer Methoden	284
4.2.3 Kühlwasserbehandlung mit Korrosionsinhibitoren	284
4.2.3.1 Theoretische Grundlagen der Korrosionsinhibierung	284
a) Anodische Korrosionsinhibitoren	286
b) Kathodische Inhibitoren	292
4.2.3.2 Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht	292
4.2.3.3 Korrosionsinhibierung der verschiedenen Kühlsysteme	295
a) Durchlaufkühlung	295
b) Offene Kühlwasserkreisläufe	298
4.2.3.4 Beeinträchtigung der Inhibitorwirkung durch Beläge	299
a) Vorbehandlung	299
b) Vorreinigung	301
4.2.4 Korrosionsinhibierung in offenen Kühlwasserkreislaufsystemen	302
4.2.4.1 Allgemeine Gesichtspunkte	302
4.2.4.2 Inhibierung der galvanischen Korrosion	304
4.2.4.3 Verschiedene Korrosionsinhibitoren und ihre Wirkung	306
a) Phosphate	306
b) Chromate	309
c) Chromate und Zinksalze	311
d) Chromate und Fluoride	313
e) Molybdat	314
f) Nitrit	314
g) Natriumnitrit	315
h) Natriumsilikat	315
i) Chromverbindungen und Polyphosphat	318
j) Hexacyanferrat (II) bez. gelbes Blutlaugensalz	321
k) Organische Verbindungen	321
l) Phosphonsäure	327
m) Phosphatester	335
4.2.4.4 Korrosionsinhibierung bei Kupfer und seinen Legierungen	336
4.2.4.5 Das Verhalten von Zinksalzen im Kühlwasser	341
4.2.4.6 pH-Wert-Abhängigkeit bei der Korrosionsinhibierung	347
4.2.4.7 Zusammenfassung	349
4.2.5 Behandlung geschlossener Kühlwasserkreislaufsysteme (Beispiel: Verbrennungskraftmaschinen)	358
a) Kühlwasserbehandlung	359
b) Korrosionsschutz	360

4.2.5.1	Eigenschaften von Frostschutzmitteln	364
4.2.5.2	Verhalten von metallischen Werkstoffen bei Äthylenglykol-/Wasser- Gemischen	366
4.2.5.3	Korrosionsinhibierung	368
4.2.5.4	Korrosionsinhibierung durch Zusatz emulgierbarer Öle	373

Kapitel 5

	Werkstoffauswahl und Werkstoffbehandlung bei Kühlwasseranlagen	377
5.1	Bauarten von Wärmeaustauschern	378
5.2	Bauelemente von Rohrbündel-Wärmeaustauschern	379
5.2.1	Innenrohre	379
	a) Übersicht der gebräuchlichen Rohrwerkstoffe	379
	b) Übersicht der üblichen Korrosionsschäden	379
5.2.1.1	Allgemeine Gesichtspunkte für die Werkstoffauswahl	384
	a) Schutzschichtbildung bei Rohren aus Kupferlegierungen	386
	b) Deckschichtbildung bei Kondensatorrohren	392
	c) Lochfraßbildung bei Kupfer und Kupferlegierungen	393
	d) Verhalten metallischer Werkstoffe bei Brackwasserkühlung	395
	e) Konstruktiv bedingte Verschmutzung von Kondensatorrohren	396
	f) Stillstandskonservierung kühlwasserbedingter Anlagen	397
5.2.1.2	Werkstoffauswahl und Betriebsverhalten	399
	a) Rohrschäden bei Kondensatoren durch Vibration	402
	b) Ungleichmäßige Beaufschlagung von Kondensatoren	403
5.2.1.3	Werkstoffe für Innenrohre	404
	a) Kupferlegierungen	404
	b) Kupfer	413
	c) Kupfer-Nickel-Legierungen	418
	d) Eisenwerkstoffe	426
	e) Aluminium	450
	f) Titan	454
5.2.2	Sonstige Bauelemente	455
5.3	Kühlwasserpumpen	459
5.4	Bauelemente von Kühltürmen	462
5.4.1	Holz im Kühlturmbau	462
	a) Methoden des Holzschutzes	462
	b) Probleme der Entsorgung	468
	c) Bemerkungen zum Umweltschutz	469
5.4.2	Verbindungselemente	469
5.4.3	Sonstige Werkstoffe im Kühlturmbau	469
	a) Asbestzement und vergleichbare Werkstoffe	469
	b) Kunststoff	471
	c) Stahlbeton	473

Kapitel 6

	Schutzverfahren für kühlwasserberührte Werkstoffoberflächen	475
6.1	Anstrich- und Beschichtungsverfahren	476
6.1.1	Vorbehandlung der Werkstoffoberfläche	477
6.1.2	Zusammensetzung und Verhalten der Anstrichmittel	478
6.2	Korrosionsschutzüberzüge	481
6.2.1	Kühlwasserleitungen	481
	a) Bitumen	481
	b) Epoxidharz-Teer-Kombinationen	483
	c) Sonstige kalthärtende Überzüge	486
6.2.2	Rohrbodenbeschichtung	489
6.2.2.1	Allgemeine Gesichtspunkte für die Dickfilmbeschichtung	489
6.2.2.2	Durchführung der Beschichtung von Rohrböden	491
6.2.3	Beschichtung von Stahlbeton und ähnlichen Werkstoffen in Kühltürmen ..	492
6.2.4	Qualitätssicherung der Anstrich- und Beschichtungsverfahren	492
	a) Qualitätsprüfung	493
	b) Überwachung der Ausführung	494
6.3	Kathodische Schutzverfahren	495
6.3.1	Die Schutzstromdichte und ihre Beeinflussung	495
6.3.2	Die Verfahren des kathodischen Schutzes	498
	a) Aktivanoden	498
	b) Mit Fremdstrom betriebene kathodische Schutzsysteme	502
6.3.3	Kombinierte Korrosionsschutzverfahren	504
	a) Kombination von Korrosionsschutzüberzug mit kathodischem Schutz ..	504
	b) Kombination von Korrosionsinhibitoren mit kathodischem Schutz	507

Kapitel 7

	Analytische Überwachung	509
7.1	Automatische Überwachung des Kühlwassers	510
7.1.1	pH-Wert-Registrierung	510
7.1.2	Überwachung des Gesamtsalzgehaltes über die Leitfähigkeits-Registrierung	511
7.1.3	Bestimmung der Säurekapazität bis pH = 4,3 des Kühlwasser durch Titrierautomaten	512
7.2	Chemische Analysemethoden für das unaufbereitete Wasser (Rohwasser)	513
7.2.1	Elektrische Leitfähigkeit	513
7.2.2	Ermittlung des pH-Wertes	514
7.2.3	Ermittlung des Mineralsalzgehaltes	515

7.2.4	Bestimmung der Säurekapazität bis pH = 8,3 (p-Wert) und pH = 4,3 (m-Wert)	515
7.2.5	Ermittlung der Härte	516
7.2.6	Bestimmung der Karbonathärte	517
7.2.7	Bestimmung der Calciumionenkonzentration	517
7.2.8	Bestimmung der Chloridionenkonzentration	518
7.2.9	Sulfationenbestimmung	519
7.2.10	Bestimmung des Gehaltes an Nitrat-, Nitrit- und Ammoniumionen	519
7.2.11	Ermittlung der Konzentrationen von Eisen und Mangan	521
7.2.12	Bestimmung der molybdataktiven Kieselsäure	522
7.2.13	Bestimmung der Oxidierbarkeit der im Wasser gelösten Stoffe (Permanganatzahl)	523
7.2.14	Ermittlung des Huminsäuregehaltes	524
7.2.15	Bestimmung der Trübung eines Wassers	525
7.2.16	Chlorbedarf, Chlorzehrung	525
7.2.17	Bestimmung der freien und kalkaggressiven Kohlensäure	526
7.2.18	Bestimmung des Gehalts an gasförmig gelöstem Sauerstoff	527
7.2.19	Bestimmung des Gehaltes von Schwefelwasserstoff und Sulfiden	529
7.2.20	Bestimmung des biochemischen Sauerstoffbedarfes	529
7.3	Analysemethoden für die Kühlwasseruntersuchung	533
7.3.1	Bestimmung des Überschusses an freiem Chlor	533
7.3.2	Bestimmung von freiem Chlor, Monochloramin und Dichloramin neben- einander	534
7.3.3	Bestimmung quaternärer Ammoniumsalze	534
7.3.4	Bestimmung der Dentachlorphenolkonzentration	536
5.3.5	Bestimmung der Zinkionenkonzentration	536
7.3.6	Bestimmung der Kupferionenkonzentration	537
7.3.7	Bestimmung des Phosphatgehaltes	538
7.3.8	Bestimmung des Lignin- und Tanningehaltes in Korrosionsinhibitor- gemischen	539
7.3.9	Ermittlung des Trübstoffgehaltes	540
7.3.10	Bestimmung der Konzentration von zweiwertig negativ geladenem Schwefel (z. B. Sulfiden)	540
7.3.11	Bestimmung des Gehalts an Chromverbindungen	541
7.3.12	Bestimmung des Detergentiengehaltes	542
7.3.13	Bestimmung des Phosphonsäuregehaltes	542
7.3.14	Bestimmung von Polycarbonsäuren	544
7.4	Mikrobiologische Untersuchungen	544
7.4.1	Kühlturmholzbewuchs	545
7.4.2	Bewuchs an anderen Werkstoffen	545
7.4.3	Verstopfungen durch schleimbildende Bakterien in Wärmeaustauschern ..	546
7.4.4	Nachweis sulfatreduzierender Bakterien	547
7.5	Betriebliche Überwachung der Zusatzwasseraufbereitungsanlage und des Kühlwassers	548

7.5.1	Überwachung von Schnellentkarbonisierungsanlagen	548
	a) Bestimmung der Säurekapazität	548
	b) Bestimmung des Trübstoffgehaltes am Ablauf des Schnellreaktors	549
	c) Bestimmung der Kalkmilchkonzentration	550
	d) Beurteilung der Anlagerungskapazität des Reaktorkorns	550
	e) Überprüfung der Kornfeinheit des angelieferten Kalkhydratmehls	551
7.5.2	Überwachung von Flockungs- und Chlorungsanlagen	551
	a) Eisen (III)-Sulfatlösung	551
	b) Chlorbedarf zur Oxidation von Eisen (III)-sulfat	552
7.5.3	Überwachung von Ionenaustausch-Enthärtungsanlagen	552
	a) Überwachung schwach saurer Ionenaustausch-Enthärtungsanlagen	552
	b) Resthärtebestimmung	553
7.6	Physikalische Überwachungsverfahren (Energiedispersive Elektronenstrahl-Mikroanalyse)	554

Kapitel 8

Beeinflussung von öffentlichen Gewässern durch

Kühlwasser

8.1	Allgemeines	556
8.2	Kühlwasser und Umweltschutz	558
8.3	Wärmeeinleitung in öffentliche Gewässer	572
8.3.1	Abwärmeverteilung in Gewässern	573
8.3.2	Basistemperatur der Gewässer	575
8.3.3	Die biologische Selbstreinigung von Oberflächengewässern	576
8.3.4	Thermische Beeinflussung der biologischen Selbstreinigung	582
8.3.5	Direkter Temperatureinfluß auf Lebensvorgänge von Lebewesen	585
	a) Süßwasserverhältnisse	586
	b) Meerwasserverhältnisse	588
8.3.6	Thermische Beeinträchtigung der Fische	588
8.3.7	Begrenzung der Einleitungstemperaturen für Abwärme aus Kühlsystems	591
8.3.8	Toxischer Einfluß von Chemikalien zur Kühlwasserbehandlung auf Fische	593
8.4	Der toxische Einfluß von Metallionen auf den Vorfluter	597

Kapitel 9

Umweltbelästigungen durch versprühtes Kühlwasser

9.1	Allgemeines	602
9.2	Der Salzgehalt der atmosphärischen Luft	603
9.3	Phytotoxische Grundlagen der atmosphärischen Vegetationsschäden	604

9.4	Vegetationsschäden in der Umgebung von Kühltürmen	606
9.5	Isolatorverschmutzungen durch versprühtes Kühlwasser (Ursachen und Folgen)	609

Kapitel 10

	Arbeitsmedizinische Gesichtspunkte bei der Kühlwasserbehandlung	611
10.1	Allgemeines	612
10.2	Korrosionsinhibitoren	612
10.2.1	Chromathaltige Inhibitorgemische	612
10.2.2	Natriumnitrit	614
10.2.3	Zinksulfat	614
10.2.4	Anorganische Phosphate	615
10.3	Biozide	615
10.3.1	Chlor	615
10.3.2	Acrolein	617
10.3.3	Pentachlorphenol	618
10.3.4	Quaternäre Ammoniumverbindungen	620
10.3.5	Phosphorsäuren und Phosphonate	620
	Schrifttum	621
	Stichwortverzeichnis	647