

**Papier und Wasser:**  
Ein Lehrbuch für Restauratoren, Konservierungswissenschaftler  
und Papiermacher

Inhalt	Vorwort zur deutschen Ausgabe	xv
	Vorwort aus der Perspektive einer Restauratorin <i>Kate Colleran</i>	xvi
	Vorwort aus der Perspektive eines Konservierungswissenschaftlers <i>Jan Wouters</i>	xvii
	Einführung <i>Gerhard Banik und Irene Brückle</i>	xix
	Hinweise für LeserInnen	xxv
	Dank	xliv
1	<b>Chemisch-physikalische Grundlagen</b> <i>Gerhard Banik</i>	1
1.1	Aufbau von Materie: Atome, Elemente, Verbindungen	3
1.2	Molekulare Anziehungskräfte	7
1.3	Energie, der Antrieb chemischer Reaktionen	9
1.4	Chemische Bindungen	11
1.4.1	Die kovalente Bindung	12
1.4.2	Die Ionenbindung	14
1.5	Physikalische Wechselwirkungen	15
1.5.1	Elektronegativität – polare Moleküle	15
1.5.2	Die Wasserstoffbrückenbindung	17
1.5.3	Van-der-Waals-Kräfte	19
1.6	Kohlenstoff	19
1.6.1	Das Modell der Hybridorbitale	19
1.7	Ausgewählte Verbindungen des Kohlenstoffs – Glucose und Cellulose	21
	Zusammenfassung	24
	Bibliografie	25
2	<b>Die Eigenschaften von Wasser</b> <i>Gerhard Banik</i>	27
2.1	Die Struktur des Wassermoleküls	28
2.2	Aggregatzustände	30
2.3	Wasser in flüssigem Zustand	32
2.3.1	Oberflächenspannung	32
2.3.2	Viskosität	35
2.3.3	Flüchtigkeit	36
2.3.4	Dampfdruck	37
2.4	Wasser als Lösemittel	39

vii

2.4.1	Ionische Feststoffe	39
2.4.2	Polare organische Feststoffe	41
2.4.3	Organische Flüssigkeiten – Lösemittel <i>Alkohole – Methanol und Ethanol</i>	43
	<i>Aceton</i>	43
	<i>Unpolare organische Flüssigkeiten und Gase</i>	45
2.5	Molekulare Aggregate	46
2.5.1	Die Wasseraktivität ( $a_w$ )	47
2.6	Zusammensetzung natürlicher Wasservorkommen	49
2.6.1	Wasserhärte	50
2.7	Wasseraufbereitung	53
2.7.1	Desinfektion durch ultraviolette Strahlung	54
2.7.2	Filtration	55
2.7.3	Aktivkohlefilter	55
2.7.4	Destillation	56
2.7.5	Entmineralisierung	57
2.7.6	Umkehrosmose	58
2.7.7	Gereinigtes Wasser in der Papierrestaurierung	59
	Zusammenfassung	60
	Bibliografie	61
3	<b>Säuren, Basen und das pH-Konzept</b>	65
	<i>Gerhard Banik</i>	
3.1	Die Dissoziation des Wassers – Autoprotolyse	67
3.2	Säuren und Basen	69
3.3	Das Hydroniumion ( $H_3O^+$ )	72
3.4	Relative Stärke von Säuren und Basen	73
3.5	Das pH-Konzept	76
3.6	Acidität	79
3.7	Alkalinität	80
3.8	Der pH von Salzlösungen	81
3.9	Alaun und Aluminiumsulfat in wässriger Lösung	82
3.10	Pufferlösungen – der Carbonatpuffer	84
	Zusammenfassung	85
	Bibliografie	86
4	<b>Struktur und Eigenschaften von trockenem und nassem Papier</b>	89
	<i>Irene Brückle</i>	
4.1	Cellulose	91
4.2	Sorption von Wasser durch Cellulose	96
4.2.1	»Wasserfreie« Cellulose	97
4.2.2	Monomolekulares Wasser	97
4.2.3	Multimolekulares Wasser	99
4.2.4	Kapillares (freies) Wasser	101
4.3	Gelcharakter der Cellulose	102
4.4	Strukturebenen von Papier – trocken und nass	105
4.4.1	Das Cellulosemolekül (Ebene I)	106
4.4.2	Die Mikrofibrille (Ebene II)	106
4.4.3	Lamellen (Ebene III)	108

4.4.4	Die Faser (Ebene IV)	109
4.4.5	Die Mikrostruktur von Papier (Ebene V)	112
4.4.6	Die Makrostruktur von Papier (Ebene IV)	114
4.5	Die Porosität von Papier	117
4.6	Mechanische Eigenschaften von Papier in Abhängigkeit vom Wassergehalt	120
4.7	Das Papierstrukturmodell in Anwendung	122
	Zusammenfassung	123
	Bibliografie	124
<b>5</b>	<b>Stoffaufbereitung</b>	<b>129</b>
	<i>Irene Brückle</i>	
5.1	Komponenten nativer Cellulosefasern	131
5.1.1	Hemicellulosen	132
5.1.2	Lignin	134
5.2	Aufschlussverfahren	135
5.2.1	Mechanischer Aufschluss	136
5.2.2	Chemischer Aufschluss	137
5.2.3	Stoffbleiche	139
5.3	Auswirkung des chemischen Aufschlusses auf Zellstoffe	140
5.3.1	Porosität	142
5.3.2	Chemische Reaktivität	144
5.4.	Stoffmahlung	147
	Zusammenfassung	149
	Bibliografie	150
<b>6</b>	<b>Leimung von Papier</b>	<b>155</b>
	<i>Gerhard Banik, Irene Brückle, Reinhard Lacher und Günther Wegele</i>	
6.1	Leimungsverfahren	158
6.1.1	Oberflächenleimung	158
6.1.2	Weitere Techniken der Oberflächenveredelung	159
6.1.3	Stoff- oder Masseleimung	160
6.2	Oberflächenleimung mit Gelatine	161
6.2.1	Oberflächengeleimte Papiere	164
6.3	Masseleimung mit Harz	167
6.3.1	Harzseifen	167
6.3.2	Harzdispersionen	170
6.3.3	Harzgeleimte Papiere	171
6.3.4	Self-Sizing	174
6.3.5	Abbau der Harzleimung	174
6.4	Masseleimung mit Alkylketendimer (AKD) oder Alkylenbernsteinsäureanhydrid (ASA)	174
6.4.1	AKD- und ASA-geleimte Papiere	176
6.5	Allgemeine Eigenschaften geleimter Papiere	177
	Zusammenfassung	181
	Bibliografie	182

<b>7</b>	<b>Trocknungstechniken in der industriellen Papierproduktion</b>	<b>189</b>
	<i>D. Steven Keller</i>	
7.1	Entwässerung	191
7.1.1	Nasspartie	193
7.1.2	Trockenpartie	197
7.2	Trocknungsverhalten einzelner Lignocellulosefasern	201
7.3	Einfluss der Trocknung auf das Fasergefüge	207
7.4	Faser- und Gefügeschrumpfung	207
7.5	Einfluss der Vliesstruktur auf das Schrumpfverhalten	209
7.5.1	Faserorientierung	210
7.5.2	Eingefrorene Spannungen	211
7.6	Verfahrenstechnische Aspekte	213
7.6.1	Zugkräfte und Nassdehnung	214
7.6.2	Schrumpfung in Maschinenlaufrichtung (MD)	215
7.6.3	Trocknungsregime	216
7.6.4	Schrumpfung in Querrichtung (CD)	217
7.6.5	Glanz und Rauheit von Oberflächen	219
7.7	Trocknung handgeschöpfter Papiere	219
7.7.1	Trockenböden	219
7.7.2	Trocknung im Kontakt mit anderen Materialien	220
7.8.	Einfluss der Trocknung auf das Verhalten von Papier bei der Wiederbelebung	221
7.8.1	Dimensionsstabilität	222
7.8.2	Cockling, Verwellungen	226
7.8.3	Verhornung	226
	Zusammenfassung	227
	Bibliografie	229
<b>8</b>	<b>Einfluss des Wassers auf die Papieralterung</b>	<b>237</b>
	<i>Paul M. Whitmore</i>	
8.1	Veränderungen der Papiereigenschaften durch natürliche Alterung	239
8.1.1	Festigkeitsverlust	239
8.1.2	Akkumulation von Abbauprodukten einschließlich saurer Verbindungen	240
8.1.3	Verfärbung	241
8.1.4	Relativer Anstieg der Cellulosekristallinität	241
8.2	Mechanismen des Celluloseabbaus	241
8.2.1	Hydrolyse	241
8.2.2	Oxidation	246
8.2.3	Alkalischer Abbau	250
8.3	Mechanisch induzierte Alterungsschäden	252
8.4	Verfärbung – Chromophorenbildung	256
8.5	Untersuchung der Papieralterung	258
8.5.1	Messverfahren	259
8.5.2	Natürlich gealterte Papiere	262
8.5.3	Beschleunigte Papieralterung	263
8.6	Möglichkeiten der Langzeitstabilisierung von Papier	264
	Zusammenfassung	266
	Bibliografie	267

9	<b>Chrakterisierung von Papier</b> <i>Ute Henniges und Antje Potthast</i>	275
9.1	Allgemeine Aspekte	278
9.2	Methoden zur Charakterisierung von Papier	280
9.2.1	Mechanische Papierprüfung <i>Zugfestigkeit</i>	282
	<i>Nullzugfestigkeit</i>	284
	<i>Weiterreißfestigkeit</i>	285
	<i>Doppelfalzzahl</i>	286
	<i>Berstfestigkeit</i>	286
9.2.2	Mikroskopie	288
9.2.3	pH und alkalische Reserve	289
9.2.4	Farbmessung und Weißgrad	292
9.2.5	Molmasse und Molmassenverteilung	293
9.2.6	Celluloseoxidation	296
9.2.7	Zerstörungsfreie Papieranalytik	299
9.3	Die Bedeutung von Kinetik – Voraussetzungen und Anwendungsmöglichkeiten	301
9.3.1	Einführung in die chemische Kinetik	301
9.3.2	Anwendung der chemischen Kinetik zur Charakterisierung von Papier	302
9.3.3	Der Arrheniusplot: Erstellung und Extrapolation	304
	Zusammenfassung	310
	Bibliografie	310
10	<b>Wasseraufnahme durch Papier: Einfluss von Klimafaktoren</b> <i>Irene Brückle und Gerhard Banik</i>	319
10.1	Feuchte	321
10.2	Die Gleichgewichtsfeuchte	324
10.3	Absorption von flüssigem Wasser	328
10.4	Mechanismen des Wassertransports in Papier	332
10.5	Schwankungen der relativen Feuchte	336
10.6	Papierbefeuchtung in der Restaurierung	340
10.6.1	Befeuchtungskammern	343
10.6.2	Vernebelungs- und Sprühtechniken	346
10.7	Benetzungshilfen	348
10.8	Einflussfaktoren	351
10.8.1	Vorangegangene wässrige Behandlungen	351
10.8.2	Vorangegangene Behandlungen mit Lösemitteln	352
10.8.3	Materialspezifische Faktoren	352
	Zusammenfassung	354
	Bibliografie	354
11	<b>Wässrige Extraktion alterungsbedingter Verfärbungen aus Papier</b> <i>Vincent Daniels</i>	359
11.1	Farbige Alterungsprodukte	361
11.2	Wässern von Papier vs. Waschen von Textilien	362
11.3	Diffusion – Massentransport	364

11.3.1	Einfluss von Papierdicke, -typ und Massenstrom	370
11.4	Wässerungsparameter	372
11.4.1	Experimentelle Voraussetzungen	372
11.4.2	Wässerungszeit	373
11.4.3	Wassertemperatur	375
11.4.4	Papierbefeuchtung vor der Wässerung	377
11.4.5	Netzmittelzusatz	378
11.4.6	Zusatz von Entsäuerungsschemikalien	380
	Zusammenfassung	381
	Bibliografie	382
<b>12</b>	<b>Wässern von Papier</b>	<b>385</b>
	<i>Joanna M. Kosek</i>	
12.1	Physikalische Grundlagen	390
12.1.1	Diffusion	391
12.1.2	Kapillarität	392
12.1.3	Hydrostatischer oder Gravitationsdruck	392
12.1.4	Unterdruck	393
12.1.5	Temperatur	394
12.2	Vorbereitende Arbeiten	395
12.3	Wässerungstechniken	397
12.3.1	Wässern im Bad (immersion washing)	397
12.3.2	Schwimmend Wässern (float washing)	398
12.3.3	Kapillarreinigung auf Löschkarton (blotter washing)	405
12.3.4	Wässern auf dem Unterdrucktisch (suction table washing)	407
12.4	Kombination wässriger Behandlungsmethoden	410
12.5	Bewertungsmöglichkeiten	411
	Zusammenfassung	412
	Bibliografie	413
<b>13</b>	<b>Wässrige Entsäuerung von Papier</b>	<b>419</b>
	<i>Anthony W. Smith</i>	
13.1	Cellulose als Ionenaustauscher	422
13.2	Grundlagen	425
13.3	Chemie wässriger Entsäuerungslösungen	429
13.3.1	Das System Kohlendioxid–Wasser	429
13.3.2	Calciumhydrogencarbonat – $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$	432
13.3.3	Magnesiumhydrogencarbonat – $\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$	437
13.3.4	Calciumhydroxid – $\text{Ca}(\text{OH})_2$	443
13.3.5	Ammoniak – $\text{NH}_3 / \text{NH}_4\text{OH}$	446
13.4	Alkalinität	450
13.5	Alkalische Reserve	452
13.5.1	Wirksamkeit	453
13.6	Wässrige Papierentsäuerung in der Praxis	456
13.6.1	Anforderungen	457
13.6.2	Risiken	457
13.6.3	Begleitende Kontrolle	458
13.6.4	Bewertung der Behandlungsqualität	459
	Zusammenfassung	461
	Bibliografie	464

14	Papiertrocknung in der Restaurierung <i>Irene Brückle und Gerhard Banik</i>	469
14.1	Trocknungstechniken der industriellen Papierherstellung und der Restaurierung	473
14.2	Grundlagen	474
14.2.1	Trocknung durch Wasserverdunstung	476
14.2.2	Gefriertrocknung	477
14.3	Wirkung freier Lufttrocknung auf die dimensionalen Eigenschaften der Papierstruktur	480
14.3.1	Oberflächen	481
14.3.2	Planlagestörungen <i>Cockling</i> <i>Curl</i>	482
14.3.3	Blattdimension	483
14.3.4	Mechanische Eigenschaften	485
14.4	Vorbereitende Überlegungen zur Trocknung von Papier in der Restaurierung	486
14.5	Freie Lufttrocknung	488
14.6	Modifizierte Lufttrocknung	490
14.7	Trocknung unter Druck	491
14.8	Haftungstrocknung	494
14.9	Spanntrocknung	495
14.10	Luftströmungstrocknung	496
14.11	Sonderfälle der Planlegung	497
14.11.1	Schließung klaffender Risse	498
14.11.2	Planlegung gerollter Papiere	499
14.11.3	Planlegung von Knicken	501
14.12	Faktoren bei der Trocknung historischer Papierdokumente	502
	Zusammenfassung	504
	Bibliografie	504
15	Wässrige Behandlungen: Nutzen, Risiken und Folgen <i>Irene Brückle</i>	511
15.1	Nutzen und Risiken wässriger Behandlungen von Papier	512
15.2	Risikofaktoren	515
15.2.1	Alterungsprodukte	516
15.2.2	Blattdimensionen	517
15.2.3	Molekulare Strukturen der Cellulose	517
15.2.4	Farbmittel	518
15.2.5	Veränderungen der Materialzusammensetzung	518
15.2.6	Frühere wässrige Behandlungen	519
15.3	Wissenschaftliche Grundlagen von Behandlungsstrategien	520
15.3.1	Erhalt signifikanter Verfärbungen	520
15.3.2	Kontrolle von Dimensionsveränderungen	523
15.3.3	Extraktion und Abscheidung von Komponenten	523
15.4	Strategien der Entscheidungsfindung	524
15.4.1	Prognose des Behandlungsergebnisses	524
15.4.2	Einbeziehung kultureller Interessen	525
15.4.3	Modelle der Entscheidungsfindung	526
	Zusammenfassung	528
	Bibliografie	529

<b>Anhang</b>	A1	Periodensystem der Elemente (Ausschnitt)	533
	A2	Internationales Einheitensystem (SI)	534
	A2.1	SI-Basiseinheiten	536
	A2.2	Abgeleitete SI-Einheiten	537
	A2.3	SI-Vorsätze	537
	A2.4	Umrechnungsfaktoren: Nicht-SI-Einheiten → SI-Einheiten	538
	A3	Konzentrationen von Lösungen	541
	A3.1	Konzentrationsmaße	542
	A3.1.1	Molare Konzentration (Stoffmengenkonzentration)	542
	A3.1.2	Relative Konzentrationsmaße	544
	A3.2	Definitionen	547
	A3.2.1	Masse	547
	A3.2.2	Stoffmenge	547
	A4	Hydrometrisches (psychrometrisches) Diagramm	549
	A5	Hygrometrisches Diagramm (Nomogramm)	550
	A6	Wasseraktivität – Bedeutung für den chemischen und mikrobiellen Papierabbau	551
	A7	Relative Luftfeuchte (rf) über gesättigten Salzlösungen	555
	A8	Prüfung des Wasseraufnahmevermögens und der Benetzung von Papieren	556
	A9	Einfache Untersuchungstechniken Einhaltende Sicherheitsstandards	558
	A9.1	Visualisierung der Mobilität von Protonen nach dem Grotthus-Mechanismus	559
	A9.2	Papier und Karton: pH-Bestimmung, Test auf Calciumcarbonat	561
	A9.2.1	Bestimmung des pH im Kaltextrakt nach DIN 53124:1998	562
	A9.2.2	Bestimmung des pH an Papieroberflächen nach TAPPI T529 om88 (modifiziert)	563
	A9.2.3	Hinweise zum Gebrauch von pH-Elektroden	565
	A9.2.4	Schnelltests mit pH-Indikatorstäbchen	566
	A9.2.5	Schnelltest zum Nachweis von Carbonaten	567
	A9.3	Nachweis von Aluminium	568
	A9.4	Nachweis von Eisen nach Neevel	569
	A9.5	Nachweis von Kupfer	571
	A9.6	Nachweis von Lignin nach Wiesner	572
	A9.7	Gruppennachweis von Kohlenhydraten	574
	A9.8	Nachweis von Stärke	576
	A9.9	Nachweis von Proteinen	577
	A9.10	Schnelltest zum Nachweis trocknender Öle	579
	A9.11	Nachweis reduzierender Endgruppen der Cellulose nach Fehling	580
	A10	Ergänzende deutschsprachige Literatur	582
	A11	Normen für die Bestandserhaltung historischer Objekte auf Papier	586
	A11.1	Auswahl relevanter Normen	588
		Glossar	591
		Index	665
		Autoren	675