

Inhaltsverzeichnis

Vorwort *XIII*

Teil I Die Koordinationschemie von Metalloenzymzentren 1

- 1 Säure-Base-Katalyse bei physiologischem pH-Wert: Zink(II) in Carboanhydrase und hydrolytischen Zinkenzymen 3**
 - 1.1 Carboanhydrasen 4
 - 1.1.1 Molekülbau von humaner Carboanhydrase II (hCA II) 4
 - 1.1.2 CA-Katalysezyklus 6
 - 1.1.3 Cadmium als Zentralmetall in einer ζ -CA 7
 - 1.2 Alkoholdehydrogenase 8
 - 1.3 Hydrolytische Zinkenzyme, Klasse-II-Aldolase 8
 - 1.4 Nicht katalytische Zinkzentren 9
 - 1.5 Literatur 11

- 2 Funktion und Inhibition katalytischer Zentren: Urease und Ureasehemmstoffe 15**
 - 2.1 Harnstoff im Stickstoffstoffwechsel 15
 - 2.2 Molekülbau von Urease 16
 - 2.3 Ureasekatalysezyklus 17
 - 2.4 Ureasehemmung durch Diamidophosphat 18
 - 2.5 Ureasebiosynthese: Nickeleinbau durch UreE 19
 - 2.6 Elementaranalyse an kristalliner Urease: Sumners Irrtum 20
 - 2.7 Literatur 22

- 3 Superoxidreduktion in Anaerobiern: Rubredoxin (Rd) und Superoxidreduktasen (SORs) 25**
 - 3.1 $O_2^{\bullet -}$ -Reduktion 25
 - 3.2 Rubredoxin (Rd) 26
 - 3.2.1 Aufbau von Rubredoxin 26
 - 3.2.2 Das elektrochemische Potenzial von Rubredoxin: Thermodynamik der e^- -Übertragung 27

3.3	Desulforedoxin (Dx)	29
3.4	Reorganisationsenergie einkerniger Highspin-Eisenzentren: Kinetik der e^- -Übertragung	30
3.5	Superoxidreduktasen (SORs)	31
3.5.1	Molekülbau von SORs	31
3.5.2	SOR-Katalysezyklus	32
3.6	Literatur	33
4	Anionische Liganden senken das elektrochemische Potenzial: [2Fe-2S]-Ferredoxine und Rieske-Zentren	35
4.1	Zweikernige Eisen-Schwefel-Proteine	35
4.2	[2Fe-2S]-Ferredoxin	35
4.3	Rieske-Zentren	36
4.4	Oxidationsstufen und Redoxpotenziale	37
4.5	Biosynthese von Fe-S-Clustern	38
4.6	Literatur	39
5	[4Fe-4S]-Cluster: Ein „altes“ Zentrum mit vielen Funktionen	41
5.1	Ein Blick in die Evolution	42
5.2	[4Fe-4S]-Ferredoxine und HP-Proteine	42
5.2.1	[4Fe-4S]-Cluster als $1e^-$ -Überträger	42
5.2.2	Molekülbau von [4Fe-4S]-Ferredoxinen	43
5.2.3	2[4Fe-4S]-Cluster	43
5.3	[3Fe-4S]-Cluster	43
5.4	[4Fe-3S]-Cluster	44
5.5	Aconitase	45
5.5.1	Molekülbau von Aconitase	46
5.5.2	Aconitasekatalysezyklus	47
5.6	IspG und IspH	48
5.7	Radikal-SAM-Enzyme	49
5.7.1	Molekülbau von Radikal-SAM-Enzymen	49
5.7.2	Bildung von 5'-Adenosylradikalen	51
5.7.3	Eisen-Schwefel-Cluster als Schwefelquellen	51
5.8	Literatur	52
6	Katalyse einer Redoxreaktion: Mangan- und Eisensuperoxiddismutase (MnSOD, FeSOD)	55
6.1	$O_2^{\bullet -}$ -Disproportionierung	55
6.2	Molekülbau von Fe-, Mn- und Fe/Mn-SODs	56
6.3	Mn/Fe-SOD-Katalysezyklus	57
6.4	Weitere SODs	59
6.5	Literatur	59
7	Mononukleare Nichthäm-Eisen-Enzyme	61
7.1	Isopenicillin-N-Synthase	63

7.2	Naphthalin-1,2-Dioxygenase, eine Rieske-Dioxygenase	65
7.3	Phenylalaninhydroxylase (PAH)	66
7.3.1	Monooxygenierung von Phenylalanin	67
7.3.2	Aufbau von PAH	68
7.3.3	O ₂ -Aktivierung und Regulierung	69
7.3.4	Bio- <i>Anorganisches</i> : Die Elektronenstruktur eines Highspin-Fe ^{IV} O-Zentrums	69
7.3.5	Reaktionen der transienten Fe ^{IV} =O-Spezies	72
7.4	Literatur	73
8	O-Atom-Transfer: Der Molybdopterin-Kofaktor	75
8.1	Einkernige Molybdän-Enzyme	75
8.2	Sulfitoxidase	76
8.2.1	Katalyse	77
8.3	MoCu-CO-Dehydrogenase	80
8.4	Literatur	81
9	Ein Strukturelement – viele Funktionen: Oxidodieisenzentren	83
9.1	Hämerythrin (Hr)	84
9.1.1	Molekülbau von Hämerythrin	84
9.1.2	Sauerstofftransport in Hr	84
9.2	Lösliche Methanmonooxygenase (sMMO)	85
9.2.1	Methanotrophe Bakterien	85
9.2.2	Die Hydroxylasekomponente (sMMOH) der löslichen Methanmonooxygenase	86
9.2.3	sMMO-Katalyse	87
9.3	Ribonukleotidreduktase	88
9.4	Flavodieisenenzyme	89
10	Bioliganden und Bindungsmodelle	93
10.1	Histidin	94
10.2	Aspartat und Glutamat	95
10.3	Cysteinat	95
10.4	Tyrosinat	96
10.5	Methionin	96
10.6	Porphyrinliganden	96
10.7	Literatur	98
11	High- und Lowspin-Eisen: Myoglobin und Hämoglobin	101
11.1	O ₂ -Transport	101
11.2	deoxyMb	102
11.3	oxyMb	103
11.4	MbCO	104
11.5	¹ Fe ^{II} - ¹ O ₂ , ² Fe ^{III} - ² O ₂ ^{•-} oder ³ Fe ^{II} - ³ O ₂ ?	106
11.6	metMb	109

- 11.7 Dynamik der Be- und Entladung von Mb 110
- 11.8 Literatur 110

- 12 Häm-NO-Komplexe: P450_{nor}, Nitrophorine, MbNO, lösliche Guanylatcyclase (sGC) 113**
- 12.1 Cytochrom P450_{nor}, eine fungale NO-Reduktase 116
- 12.2 Die Fe-NO-Bindung in Häm-{FeNO}⁶-Zentren 117
- 12.3 Nitrophorine 119
- 12.4 NO-beladenes Mb, ein {FeNO}⁷-Zentrum 120
- 12.5 Die Fe-NO-Bindung in Häm-{FeNO}⁷-Zentren 120
- 12.6 Lösliche Guanylatcyclase (sGC) 121
- 12.7 Literatur 122

- 13 Redoxkatalyse mit Hämzentren: Cytochrom c, Katalase, Cytochrom P450 125**
- 13.1 Cytochrom c 125
- 13.2 Häm-Katalase 126
- 13.3 Cytochrom P450 127
- 13.4 NO-Synthasen 130
- 13.5 Literatur 131

- 14 Redoxchemie bei hohem Potenzial: blaue Kupferproteine und Cu_A-Zentren 133**
- 14.1 Blaue Kupferzentren 136
- 14.2 Plastocyanin 136
 - 14.2.1 Molekülbau von Plastocyanin 136
 - 14.2.2 Das Modell vom entatischen Zustand 137
 - 14.2.3 Der elektronische Grundzustand des Plastocyaninzentrums 137
 - 14.2.4 Die Bedeutung kovalenter Bindungen in Kupferzentren 139
- 14.3 Cu_A-Zentren 140

- 15 Aktivierung von O₂-Spezies in Kupfer-Redox-Zentren: O₂-Transport, Oxygenase-, Oxidase- und SOD-Aktivität 143**
- 15.1 Hämocyanin (Hc) 143
 - 15.1.1 Molekülbau von Hämocyanin 143
 - 15.1.2 TS-3-Cu^{II}(His)₃ – ein starkes Oxidationsmittel 144
- 15.2 Tyrosinase 146
 - 15.2.1 Molekülbau von Tyrosinase 146
 - 15.2.2 Oxidationszustände und Reaktionsschritte 147
- 15.3 Partikuläre Methanmonoxygenase (pMMO) 148
- 15.4 CuZnSOD 149
 - 15.4.1 Der Molekülbau von CuZnSOD 149
 - 15.4.2 Katalysezyklus 150
- 15.5 Mononukleare Cu-Monooxygenasen 151
- 15.6 Kupfer(III) in der Biochemie? 152
- 15.7 Literatur 153

- 16 Proteinogene Radikale als Liganden: Galactose-Oxidase (GO) und Cytochrom-c-Oxidase (CcO) 155**
- 16.1 Galactose-Oxidase 155
 - 16.1.1 Molekülbau von GO 156
 - 16.1.2 Katalyse 157
 - 16.2 Cytochrom-c-Oxidase (CcO) 158
 - 16.2.1 Struktur des Häm-a₃-Cu_B-Zentrums in Cytochrom-c-Oxidase 159
 - 16.2.2 Katalysezyklus 160
 - 16.3 Literatur 161
- 17 Vierelektronen-Katalyse, zweiter Teil: Der O₂-freisetzende Komplex in Photosystem II 163**
- 17.1 Die fünf Zustände 163
 - 17.2 Die Struktur des Photosystems II 164
 - 17.3 Oxidationszustände des OEC und Katalysezyklus 166
 - 17.4 Synthetische Katalysatoren für die Wasseroxidation 168
 - 17.4.1 Redoxkatalyse mit Manganoxiden 169
 - 17.5 Literatur 169
- 18 Hydrogenasen 171**
- 18.1 H₂-Aktivierung 171
 - 18.2 [NiFe]-Hydrogenasen 172
 - 18.2.1 Katalysezyklus 173
 - 18.2.2 Der μ-Hydrido-Zustand 174
 - 18.2.3 Die Biosynthese des aktiven Zentrums 174
 - 18.3 [FeFe]-Hydrogenase 175
 - 18.4 [Fe]-Hydrogenase (Hmd) 177
 - 18.5 Literatur 178
- 19 Nitrogenase 181**
- 19.1 N₂-Reduktion 181
 - 19.2 Molekülbau von Nitrogenase 182
 - 19.3 Katalysezyklus 183
 - 19.4 Biosynthese von P- und M-Cluster 184
 - 19.5 Literatur 185
- 20 Organometallchemie in Organismen I: cobalaminabhängige Methioninsynthase 187**
- 20.1 Vitamin-B₁₂-Derivate 187
 - 20.2 Methioninsynthase 188
 - 20.2.1 Methioninsynthase: Molekülbau und Oxidationsstufen 188
 - 20.2.2 Katalysezyklus 189
 - 20.3 Literatur 191

21	Organometallchemie in Organismen II: CO-Dehydrogenase/Acetyl-CoA-Synthase	193
21.1	CO ₂ -Reduktion: anaerobe CO-Dehydrogenasen und bifunktionelle CODH/ACSs	193
21.2	Der C-Cluster in NiCODHs	194
21.3	Der A-Cluster in NiCODHs	196
21.3.1	Die Struktur des A-Clusters in CODH/ACS	196
21.3.2	A-Cluster-Katalyse	197
21.4	Literatur	197
22	Ein technisch genutztes Metallenzym: Xylose-Isomerase („Glucose-Isomerase“)	201
22.1	Xylose-Isomerase	201
22.1.1	Molekülbau von Xylose-Isomerase	202
22.1.2	Katalyse	204
22.2	Literatur	205
23	Eisenstoffwechsel	207
23.1	Metallstoffwechsel	207
23.2	Transferrin	210
23.3	Bakterielle Siderophore	212
24	Koordinationschemische „Steckbriefe“ einiger Zentralmetalle	215
25	Elektrochemische Potenziale von Sauerstoffspezies bei pH 7	219
	Teil II Der Blick aufs Metall: Grundlegende und spezielle Methoden	221
26	Strukturanalyse von Proteinen	223
26.1	Kristallisation der Proteine	223
26.2	Röntgenbeugung	224
26.3	Röntgenstrukturanalyse	227
26.3.1	Methode des isomorphen Ersatzes	228
26.3.2	MAD-Methode (<i>Multiwavelength Anomalous Dispersion</i>)	229
26.3.3	Methode des molekularen Ersatzes (MR)	230
26.4	Die Strukturverfeinerung	230
26.5	Literatur	232
27	UV/Vis-, Fluoreszenz- und CD-Spektroskopie	233
27.1	Allgemeine Grundlagen der UV/Vis-Spektroskopie	233

27.2	Technisches	238
27.3	Allgemeine Grundlagen der Fluoreszenzspektroskopie	239
27.4	Technisches	242
27.5	Fluoreszenzlöschung	243
27.6	Förster-Energie-Transfer	244
27.7	Allgemeine Grundlagen der CD-Spektroskopie	245
27.8	Zusammenfassung	248
27.9	Literatur	248
28	Elektrochemie	249
28.1	Allgemeine Grundlagen	249
28.2	Cyclovoltammetrie	250
28.3	Einfluss der Diffusion	253
28.4	Reversible Systeme	254
28.5	Quasireversible und irreversible Systeme	256
28.6	Wichtige Kenngrößen	256
28.7	Technische Details	257
28.8	Pulsvoltammetrie	259
28.9	Differenzielle Pulsvoltammetrie	260
28.10	Square Wave Voltammetrie	261
28.11	Theorie des Elektronentransfers	262
28.12	Zusammenfassung	265
28.13	Literatur	265
29	Theoretische Methoden	267
29.1	Allgemeine Grundlagen	267
29.2	Dichtefunktionaltheorie	270
29.3	Beschreibung des Lösungsmittels	274
29.4	Optimierung der Geometrie	276
29.5	Berechnung thermodynamischer und optischer Eigenschaften	278
29.5.1	Frequenzen, Energien	278
29.5.2	UV/Vis-Spektren	280
29.5.3	NMR- und EPR-Spektren	281
29.5.4	Molekülorbitale und Ladungsverteilungen	282
29.6	Zusammenfassung	284
29.7	Literatur	284
30	Resonanz-Raman-Spektroskopie	285
30.1	Der Raman-Effekt	285
30.2	Resonanz-Raman-Spektroskopie	287
30.3	Technisches	289
30.4	Anwendung	291
30.5	Zusammenfassung	292
30.6	Literatur	292

31	Röntgenabsorptionsspektroskopie	293
31.1	Allgemeine Grundlagen	293
31.2	Technisches	295
31.3	Auswertung	296
31.4	Anwendung	298
31.5	Zusammenfassung	300
31.6	Literatur	300
32	Mößbauer-Spektroskopie	301
32.1	Allgemeine Grundlagen	301
32.2	Technisches	302
32.3	Mößbauer-Spektren und ihre Parameter	303
32.4	Anwendung: Rieske-Proteine	305
32.5	Zusammenfassung	306
32.6	Literatur	306
33	Elektronenspinresonanzspektroskopie	307
33.1	Allgemeine Grundlagen	307
33.2	Technisches	309
33.3	Spin-Bahn-Kopplung	310
33.4	Hyperfeinkopplung	311
33.5	Systeme mit einem Spin $> 1/2$	313
33.6	Anwendung I: Blaue Kupferproteine	314
33.7	Anwendung II: Eisen-Porphyrin-Systeme	315
33.8	Moderne Entwicklungen	316
33.9	Zusammenfassung	317
33.10	Literatur	318
34	Magnetische Messungen mit SQUID	319
34.1	Allgemeine Grundlagen	319
34.2	Technisches	321
34.3	Anwendung	322
34.4	Zusammenfassung	322
34.5	Literatur	323
	Sachverzeichnis	325