
Inhaltsverzeichnis

Einleitung

| | | |
|----------|---|----|
| 1 | Die Morphologie der Vertebraten | 3 |
| 1.1 | Definition, Umfang und Beziehung zu anderen Disziplinen | 3 |
| 1.2 | Warum soll man die Morphologie der Vertebraten überhaupt untersuchen? | 4 |
| 1.3 | Einige grundlegende Betrachtungen | 4 |
| 1.3.1 | Phylogenetische Homologie und Analogie | 4 |
| 1.3.2 | Biologische Homologie und die Erhaltung von Entwicklungsvorgängen | 6 |
| 1.3.3 | Andere Ähnlichkeiten | 6 |
| 1.3.4 | Adaptation | 7 |
| 1.3.5 | Form und Funktion | 8 |
| 1.3.6 | Einige Vorgehensweisen in der Morphologie | 8 |
| 1.3.7 | Erkennen und Bewerten von Variation | 10 |
| 1.3.8 | Beiträge der Paläontologie | 12 |
| 1.3.9 | Evolutionstheorie | 13 |
| 1.3.10 | Evolution und Habitat | 14 |
| 1.3.11 | Gleichgewicht, Veränderung und Aussterben | 16 |
| | Exkurs 1.1. Kontinentaldrift und die Verteilung von Fossilien | 17 |
| 1.3.12 | Trends in der Evolution | 18 |
| 1.3.13 | Parallelismus und Konvergenz | 20 |
| | Allgemeine Literatur zur Einleitung und zu den Teilen I und II | 22 |

Teil I**Übersicht über die Vertebraten
Die hauptsächlich morphologischen Muster**

| | | |
|----------|---|-----------|
| 2 | Charakterisierung, Ursprung und Einteilung der Vertebraten . . | 27 |
| 2.1 | Beziehung der Vertebraten zu Nicht-Chordaten | 27 |
| 2.2 | Beziehung der Vertebraten zu anderen Chordaten | 28 |
| 2.3 | Der Ursprung der Vertebraten | 31 |
| 2.4 | Klassifikation der Vertebraten | 33 |
| 2.4.1 | Das Ziel | 33 |
| 2.4.2 | Die ersten 200 Jahre | 33 |
| 2.4.3 | Traditionelle Systematik | 33 |
| 2.4.4 | Kladistische oder phylogenetische Systematik | 36 |
| | Exkurs 2.1. Das Problem der Benennung von Schwestergruppen | 38 |
| | Literatur | 39 |
| 3 | Fische | 41 |
| 3.1 | Klasse Agnatha (Kieferlose) | 41 |
| 3.1.1 | Cyclostomata und die Unterklasse Myxinoidea | 42 |
| 3.1.2 | Unterklasse Petromyzontia | 43 |
| 3.1.3 | Unterklasse Pteraspidomorpha | 43 |
| 3.1.4 | Unterklasse Cephalaspidomorpha | 44 |
| 3.1.5 | Einige andere Agnathen | 44 |
| | Exkurs 3.1. Conodontia und andere alte Vertebraten | 45 |
| 3.2 | Kiefertragende Fische | 45 |
| 3.2.1 | Klasse Placodermi | 47 |
| 3.2.2 | Klasse Chondrichthyes (Knorpelfische) | 47 |
| 3.2.3 | Klasse Acanthodii | 51 |
| 3.2.4 | Klasse Osteichthyes (Knochenfische) | 51 |
| | Literatur | 56 |
| 4 | Tetrapoda | 59 |
| 4.1 | Übergang zum Landleben | 59 |
| 4.2 | Klasse Amphibia (Amphibien) | 59 |
| 4.2.1 | Unterklasse Ichthyostegalia | 60 |
| 4.2.2 | Unterklassen Anthracosauria und Temnospondyli | 60 |
| 4.2.3 | Unterklasse Lissamphibia | 61 |
| 4.3 | Klasse Reptilia (Reptilien) | 62 |
| 4.3.1 | Unterklasse Anapsida | 63 |
| 4.3.2 | Unterklasse Synapsida | 63 |
| 4.3.3 | Unterklasse Diapsida | 63 |
| 4.3.4 | Unterklasse Testudinata | 65 |
| 4.4 | Klasse Aves (Vögel) | 67 |

| | |
|--|----|
| Exkurs 4.1. Federn fliegen über die Entstehung der Vögel | 68 |
| 4.4.1 Unterklasse Archaeornithes | 69 |
| 4.4.2 Unterklasse Enantiornithes | 69 |
| 4.4.3 Ornithurae und die Unterklasse Neornithes | 69 |
| 4.5 Klasse Mammalia (Säugetiere) | 71 |
| 4.5.1 Unterklasse Prototheria | 71 |
| 4.5.2 Unterklasse Allotheria | 72 |
| 4.5.3 Unterklasse Theria | 72 |
| Literatur | 74 |

Teil II

Die Phylogenie und Ontogenie von Strukturen Evolution in Bezug auf die Zeit und die Haupttaxa

| | |
|--|-----|
| 5 Frühe Entwicklung | 79 |
| 5.1 Embryologie und Morphologie | 79 |
| 5.1.1 Entwicklung und Ahnenreihe | 79 |
| 5.1.2 Heterochronie | 80 |
| 5.1.3 Entwicklungsbedingte Einschränkungen der Formbildung | 81 |
| 5.2 Gameten und Befruchtung | 82 |
| 5.3 Furchung | 83 |
| Exkurs 5.1. <i>Hox</i> -Gene und Entwicklung: Fenster zur Evolution | 85 |
| 5.4 Gastrulation und Keimblattbildung | 86 |
| 5.5 Neurulation, Neuralleisten und ectodermale Plakoden | 90 |
| 5.6 Festlegung der Baupläne und Schicksal der Keimschichten | 91 |
| 5.7 Embryonale Hüllen und Placentation | 93 |
| Literatur | 94 |
| 6 Integument und seine Derivate | 97 |
| 6.1 Funktionen des Systems | 97 |
| 6.2 Entwicklung und allgemeine Struktur der Haut | 97 |
| 6.3 Allgemeine Entwicklung von Hautderivaten | 99 |
| 6.4 Das Integument der Fische: Betonung der dermalen Derivate | 100 |
| 6.4.1 Weiche Strukturen | 100 |
| 6.4.2 Entwicklung und Struktur von harten Geweben | 100 |
| 6.4.3 Phylogenie der Knochenschuppen und ihrer Derivate | 103 |
| Exkurs 6.1. Mehr über Knochengewebe | 105 |
| Exkurs 6.2. Der Ursprung komplexer Schuppen und Panzer ist ein komplexes Problem | 106 |
| 6.5 Integument der Tetrapoden: Betonung der epidermalen Derivate | 107 |
| 6.5.1 Die Haut lebender und ausgestorbener Amphibien | 107 |

| | | |
|---|--|-----|
| 6.5.2 | Die Haut der Reptilien: Hornschuppen | 108 |
| 6.5.3 | Die Haut der Vögel: Dünne Haut mit Federn | 110 |
| Exkurs 6.3. Ursprung und Evolution | | 111 |
| 6.5.4 | Haut, Schuppen, Klauen und Hautdrüsen der Säugetiere | 113 |
| 6.5.5 | Das Haar | 115 |
| 6.5.6 | Hörner und Geweihe | 116 |
| 6.6 | Phylogenie? | 118 |
| | Literatur | 118 |
| 7 | Zähne | 121 |
| 7.1 | Herkunft und Struktur | 121 |
| 7.2 | Entwicklung | 122 |
| 7.3 | Verankerung und Zahnwechsel | 123 |
| Exkurs 7.1. Die Zähne von räuberischen Haien | | 124 |
| 7.4 | Evolution der Zähne | 125 |
| 7.4.1 | Vom zahnchenträgenden Panzer zur Heterodontie | 125 |
| 7.4.2 | Einige Folgen des Kauens | 126 |
| 7.4.3 | Anzahl und Arten von Zähnen | 127 |
| 7.4.4 | Mehr über Backenzähne | 128 |
| | Literatur | 129 |
| 8 | Kopfskelett | 131 |
| 8.1 | Bedeutung des Skeletts für die Morphologie | 131 |
| 8.2 | Mehr über harte Gewebe | 132 |
| 8.3 | Ursprung des Kopfes und die Komponenten des Kopfskeletts | 133 |
| Exkurs 8.1. Die aufregende Frage der Kopfsegmentation | | 134 |
| 8.3.1 | Das Neurocranium (Chondrocranium) und seine Derivate | 135 |
| 8.3.2 | Das Visceralskelett und seine Derivate | 138 |
| 8.3.3 | Beiträge des Integuments: Dermatocranium | 140 |
| 8.4 | Beziehungen der cranialen Komponenten untereinander | 141 |
| 8.5 | Evolution des Kopfskeletts | 142 |
| 8.5.1 | Kieferlose Vertebraten: Neuerfindungen und Variabilität | 142 |
| 8.5.2 | Placodermi: Der Beginn der Kiefer | 143 |
| 8.5.3 | Knorpelfische: Spezialisierung und Rückbildung | 143 |
| 8.5.4 | Knochenfische: Vielfalt und Komplexität | 144 |
| 8.5.5 | Amphibien: Konservatismus oder Rückbildung | 146 |
| 8.5.6 | Reptilien und Vögel: Variationen des Grundbauplans | 148 |
| 8.5.7 | Säugetiere: Einige weitere Modifikationen | 155 |
| 8.5.8 | Zusammenfassung der Prinzipien und Entwicklungstendenzen | 158 |
| Exkurs 8.2. Schädel in drei Dimensionen | | 159 |
| 8.6 | Merkmale des Schädels | 160 |
| | Literatur | 161 |

| | | |
|---|---|-----|
| 9 | Körperskelett | 163 |
| 9.1 | Struktur und Entwicklung der Wirbel | 163 |
| 9.1.1 | Allgemeine Struktur | 163 |
| 9.1.2 | Entwicklung und Homologie | 165 |
| 9.2 | Evolution der Wirbelsäule | 166 |
| 9.2.1 | Die Anfänge: Die Chorda dorsalis mit stützenden Knorpeln | 166 |
| 9.2.2 | Höherentwickelte Fische: Die Wirbelsäule macht sich breit | 167 |
| 9.2.3 | Amphibien: Verschiedene Lösungen für neue Probleme | 168 |
| 9.2.4 | Amnioten: Festigkeit und Spezialisierung | 169 |
| 9.2.5 | Craniovertebrales Gelenk | 171 |
| Exkurs 9.1. Signale für die Differenzierung | | 172 |
| 9.3 | Rippen | 172 |
| 9.4 | Sternum | 173 |
| 9.5 | Ursprung der Extremitäten | 174 |
| 9.6 | Mediane Flossen | 175 |
| 9.6.1 | Dorsal- und Analflossen | 175 |
| 9.6.2 | Schwanzflosse | 176 |
| 9.7 | Struktur und Evolution der Extremitätengürtel | 177 |
| 9.7.1 | Extremitätengürtel der Fische | 177 |
| 9.7.2 | Extremitätengürtel der Tetrapoden | 178 |
| 9.8 | Struktur und Evolution der paarigen Flossen | 181 |
| 9.9 | Ursprung, Evolution, Struktur und Entwicklung der Gliedmaßen .. | 183 |
| 9.10 | Struktur und Wachstum langer Knochen | 185 |
| 9.11 | Charakteristika der Tetrapodengliedmaßen | 187 |
| 9.12 | Verschiedene andere Knochen | 191 |
| | Literatur | 192 |
| 10 | Muskeln und elektrische Organe | 193 |
| 10.1 | Grobstruktur und Funktion der Muskeln | 193 |
| 10.2 | Histologie, Physiologie und Kontraktion | 195 |
| 10.2.1 | Feinstruktur | 195 |
| 10.2.2 | Längen-Spannungs- und Kraft-Geschwindigkeitsbeziehung | 199 |
| 10.2.3 | Fasertypen | 200 |
| 10.2.4 | Kraft (oder Spannung) muskulärer Kontraktion | 201 |
| 10.2.5 | Elektromyographie und die Messung von Belastung | 202 |
| 10.3 | Verkürzung, Arbeit, Kraft und Hebel | 203 |
| 10.3.1 | Kraft | 203 |
| 10.3.2 | Arbeit | 203 |
| 10.3.3 | Hebel | 204 |
| 10.4 | Kategorien von Muskeln | 206 |
| 10.5 | Evolution der Muskeln | 206 |
| 10.5.1 | Grundlagen für die Etablierung von Homologien | 206 |
| 10.5.2 | Muskeln primärer Schwimmer | 206 |
| 10.5.3 | Axial- und Hypobranchialmuskeln der Tetrapoden | 210 |
| 10.5.4 | Appendikularmuskeln der Tetrapoden | 213 |
| 10.5.5 | Branchialmuskeln bei Tetrapoden | 216 |

| | | |
|-----------|--|-----|
| 10.5.6 | Extrinsische Hautmuskeln und Augenmuskeln der Tetrapoden | 216 |
| 10.6 | Elektrische Organe | 219 |
| | Literatur | 220 |
| 11 | Coelom und Mesenterien | 221 |
| 11.1 | Aufbau und Funktion | 221 |
| 11.2 | Entwicklung, Evolution und Rekapitulation | 221 |
| | Literatur | 225 |
| 12 | Verdauungssystem | 227 |
| 12.1 | Allgemeine Funktion und Struktur | 227 |
| 12.2 | Entwicklung des Darmkanals | 228 |
| 12.3 | Struktur, Adaption und Evolution | 228 |
| 12.3.1 | Mund und Mundhöhle | 228 |
| 12.3.2 | Feinstruktur des Darmkanals im Allgemeinen | 231 |
| 12.3.3 | Ösophagus und Magen | 232 |
| 12.3.4 | Darm und Blinddarm | 236 |
| 12.3.5 | Anpassungen des Darms | 238 |
| | Exkurs 12.1. Faser, Fermentation und Form des Darms | 241 |
| 12.3.6 | Leber und Gallenblase | 243 |
| 12.3.7 | Pankreas | 244 |
| | Literatur | 245 |
| 13 | Atmungssystem und Schwimmblase | 247 |
| 13.1 | Allgemeine Funktion und Anforderungen | 247 |
| 13.2 | Aquatische Gasaustauscher | 248 |
| 13.2.1 | Hautatmung | 248 |
| 13.2.2 | Entwicklung und Struktur des Pharynx | 248 |
| 13.2.3 | Allgemeiner Aufbau und Funktion von Kiemen | 249 |
| 13.2.4 | Evolution der inneren Kiemen | 253 |
| 13.2.5 | Äußere Kiemen | 254 |
| 13.3 | Ventilation der inneren Kiemen | 255 |
| 13.4 | Luft-Gasaustauscher | 255 |
| 13.4.1 | Ursprung und Entwicklung | 255 |
| 13.4.2 | Lungen und Schwimmblasen von Fischen | 257 |
| 13.4.3 | Evolution der Lungen von den Amphibien zu den Säugetieren | 259 |
| 13.4.4 | Vogellunge und Luftsäcke | 262 |
| 13.5 | Ventilation der Lungen: Aufbau, Evolution und Verbindungen | 265 |
| | Literatur | 267 |
| 14 | Kreislaufsystem | 269 |
| 14.1 | Allgemeine Funktion und Aufbau des Systems | 269 |
| 14.2 | Das Herz | 270 |
| 14.2.1 | Entwicklung | 270 |
| 14.2.2 | Das primitive Herz: eine Einzelkreislaufpumpe | 271 |

| | | |
|--|--|-----|
| 14.2.3 | Von den Lungenfischen zu den Reptilien: intermediäre und fakultative Herzen | 273 |
| 14.2.4 | Herzen von Endothermen: eine Doppelkreislaufpumpe | 275 |
| 14.2.5 | Regulation des Herzschlags | 276 |
| 14.2.6 | Zusammenfassung der Herz-Evolution | 277 |
| 14.3 | Blut und blutbildende Gewebe | 277 |
| 14.4 | Blutgefäße | 279 |
| 14.4.1 | Entwicklung und Struktur | 279 |
| 14.4.2 | Das anfängliche Muster der Arterien | 280 |
| 14.4.3 | Evolution der anterioren Arterien | 282 |
| 14.4.4 | Evolution der posterioren Arterien | 284 |
| 14.4.5 | Das Grundmuster der Venen | 284 |
| 14.4.6 | Evolution der anterioren Venen | 286 |
| 14.4.7 | Evolution des Leberpfortadersystems | 288 |
| 14.4.8 | Evolution des Nierenpfortadersystems | 289 |
| 14.4.9 | Evolution der posterioren somatischen und placentalen Venen | 289 |
| 14.5 | Einige funktionelle Betrachtungen | 295 |
| 14.5.1 | Antwort auf spezielle Bedürfnisse von Geweben und Organen | 295 |
| 14.5.2 | Weitere Antworten auf die Schwerkraft | 298 |
| Exkurs 14.1. Einblicke in die Form und Funktion des Kreislaufs aus der Sicht der Strömungslehre | | 299 |
| 14.5.3 | Rolle bei der Thermoregulation | 300 |
| 14.6 | Evolution des Lymphsystems | 301 |
| | Literatur | 303 |

15 Exkretionssystem und Osmoregulation

| | | |
|--------|---|-----|
| 15.1 | Allgemeiner Aufbau und Entwicklung der Nieren | 305 |
| 15.1.1 | Funktion und Charakteristika | 305 |
| 15.1.2 | Entwicklung | 306 |
| 15.2 | Evolution und Struktur der Vertebratennieren | 307 |
| 15.2.1 | Holonephros: Ursprüngliche Niere | 307 |
| 15.2.2 | Pronephros: Larvale Niere oder spezialisierter Überrest | 307 |
| 15.2.3 | Opisthonephros: Niere der Anamnioten | 308 |
| 15.2.4 | Metanephros: Niere der Amnioten | 309 |
| 15.3 | Nierenstruktur in Zusammenhang mit der Osmoregulation | 310 |

| | |
|--|-----|
| Exkurs 15.1. <i>Branchiostoma</i> und der Ursprung des Vertebratennephrons | 312 |
|--|-----|

| | | |
|------|------------------|-----|
| 15.4 | Harnblasen | 316 |
| | Literatur | 316 |

16 Fortpflanzungssystem und Ausführgänge des Urogenitalsystems

| | | |
|--------|--|-----|
| 16.1 | Frühe Entwicklung und Abstammung der Gonaden | 319 |
| 16.2 | Struktur der Gonaden | 320 |
| 16.2.1 | Ovar | 320 |
| 16.2.2 | Hoden | 323 |

| | | |
|--------|--|-----|
| 16.3 | Urogenitalgänge und akzessorische Organe | 325 |
| 16.3.1 | Ursprünge | 325 |
| 16.3.2 | Männliche Ausführungsgänge | 326 |
| 16.3.3 | Weibliche Ausführungsgänge | 328 |
| 16.4 | Die Kloake und ihre Derivate | 330 |
| 16.5 | Kopulationsorgane | 332 |
| 16.6 | Fortpflanzungsstrategien | 333 |
| | Literatur | 334 |

17 Nervensystem: Allgemeines, Rückenmark und periphere Nerven 337

| | | |
|---|---|-----|
| 17.1 | Elemente des Nervensystems | 338 |
| 17.1.1 | Neurone und Neuroglia | 338 |
| 17.1.2 | Nervenimpulse und Synapse | 340 |
| 17.1.3 | Trakte, Nerven und Ganglien | 341 |
| 17.1.4 | Einige Unterteilungen des Systems | 342 |
| 17.2 | Entwicklung des Rückenmarks und der peripheren Nerven | 342 |
| 17.3 | Rückenmark | 343 |
| 17.3.1 | Funktion und Struktur | 343 |
| Exkurs 17.1. Auf der Spur von Evolutionstendenzen im Rückenmark | | 345 |
| 17.3.2 | Evolution des Rückenmarks | 346 |
| 17.4 | Entwicklung der Spinalnerven | 348 |
| 17.5 | Hirnnerven | 349 |
| 17.5.1 | Ursprung und Aufbau | 349 |
| 17.5.2 | Struktur und Evolution der Hirnnerven | 352 |
| 17.6 | Autonomes Nervensystem | 354 |
| | Literatur | 357 |

18 Nervensystem: Gehirn 359

| | | |
|--|--|-----|
| 18.1 | Wie das Gehirn untersucht wird | 359 |
| Exkurs 18.1. Nichtinvasive Studien des Gehirns versprechen Fortschritt | | 360 |
| 18.2 | Entwicklung des Gehirns | 361 |
| 18.3 | Mehr über die Organisation des Gehirns | 363 |
| 18.4 | Posteriorer Hirnstamm: Medulla bis Mittelhirn | 365 |
| 18.4.1 | Kerne der Hirnnerven | 365 |
| 18.4.2 | Formatio reticularis | 366 |
| 18.4.3 | Andere Kerne des posterioren Hirnstamms | 366 |
| 18.4.4 | Weitere Merkmale des posterioren Hirnstamms | 369 |
| 18.5 | Anteriorer Hirnstamm: Diencephalon | 369 |
| 18.6 | Cerebellum und Pons | 372 |
| 18.7 | Cerebrum (Vorderhirn) | 373 |
| 18.7.1 | Allgemeine Struktur | 373 |
| 18.7.2 | Bulbus olfactorius und Tractus olfactorius | 374 |
| 18.7.3 | Corpus striatum und Basalkerne | 374 |
| 18.7.4 | Cortex | 376 |
| 18.7.5 | Einige andere Merkmale des Großhirns (Cerebrums) | 380 |

| | | |
|-------|--|-----|
| 18.8 | Schaltkreise, Vielseitigkeit und Gedächtnis | 381 |
| 18.9 | Evolution des Gehirns | 381 |
| 18.10 | Unterstützung und Ernährung des Zentralnervensystems | 386 |
| | Literatur | 387 |

19 Sinnesorgane

| | | |
|--------|---------------------------------------|-----|
| 19.1 | Einige verschiedene kleine Rezeptoren | 389 |
| 19.2 | Organe der Chemorezeption | 392 |
| 19.2.1 | Geruchsorgane | 392 |
| 19.2.2 | Pheromonrezeptoren | 394 |
| 19.2.3 | Geschmacksorgane | 394 |

| | |
|--|-----|
| Exkurs 19.1. Vomeronasalorgan: Kein Mysterium mehr, aber Fragen bleiben offen | 395 |
|--|-----|

| | | |
|--------|--------------------------------------|-----|
| 19.3 | Seitenliniensystem: Elektrorezeption | 396 |
| 19.4 | Ohr | 398 |
| 19.4.1 | Gleichgewichtsorgan | 398 |
| 19.4.2 | Hörorgan | 399 |
| 19.4.3 | Evolution des Ohres | 402 |
| 19.5 | Augen | 404 |
| 19.5.1 | Struktur und Funktion | 405 |
| 19.5.2 | Ursprung und Entwicklung | 409 |
| 19.5.3 | Evolution der seitlichen Augen | 410 |

| | |
|---|-----|
| Exkurs 19.2. Konservation und Innovation: Orientierungspunkte für zukünftige Studien | 412 |
|---|-----|

| | | |
|--------|-------------|-----|
| 19.5.4 | Dorsalaugen | 413 |
| | Literatur | 414 |

20 Endokrine Drüsen

| | | |
|--------|--|-----|
| 20.1 | Chemische Vermittlung | 417 |
| 20.2 | Allgemeiner Aufbau des Hormonsystems | 417 |
| 20.2.1 | Struktur und Gliederung des Hormonsystems | 417 |
| 20.2.2 | Allgemeiner Aufbau endokriner Drüsen | 419 |
| 20.3 | Neurohormone | 420 |
| 20.4 | Die Hypophyse | 421 |
| 20.4.1 | Die Neurohypophyse: eine autonome Hormondrüse | 422 |
| 20.4.2 | Die Adenohypophyse: eine Hormondrüse I. Ordnung | 423 |
| 20.4.3 | Evolution der Hypophyse | 423 |
| 20.5 | Hormondrüsen II. Ordnung | 424 |
| 20.5.1 | Thyreoidea | 424 |
| 20.5.2 | Parathyreoidea | 425 |
| 20.5.3 | Ultimobranchiale Körper und parafollikuläre Zellen | 425 |
| 20.5.4 | Interrenales Organ und Nebennierenrinde | 426 |
| 20.5.5 | Chromaffine Körper und Nebennierenmark | 426 |
| 20.5.6 | Gonaden und Placenta | 427 |
| 20.6 | Gewebshormone | 428 |

| | |
|------------------------|-----|
| 20.7 Parahormone | 428 |
| Literatur | 429 |

Teil III

Strukturelle Adaptation: Evolution in Verbindung zu Lebensweise und Habitat

| | |
|---|------------|
| 21 Strukturelemente des Körpers | 433 |
| 21.1 Tiere als Spezialisten | 433 |
| 21.2 Eigenschaften der unterstützenden Materialien | 434 |
| 21.3 Spannung und Spannungslinien | 438 |
| Exkurs 21.1. Biegespannung kann kompliziert sein | 441 |
| 21.4 Gebrauch und Design struktureller Elemente | 441 |
| 21.4.1 Sehnen, Ligamente und Knorpel | 441 |
| 21.4.2 Knochen, die Druck oder Zug widerstehen | 444 |
| 21.4.3 Knochen, die der Biegung in einer Ebene widerstehen | 445 |
| 21.4.4 Knochen, die der Biegung in verschiedenen Ebenen widerstehen .. | 445 |
| Exkurs 21.2. Umstrukturierung von Knochen: Vorgang und Stimulus | 448 |
| 21.5 Verbindungen struktureller Elemente | 449 |
| 21.5.1 Sehne mit Muskel; Sehne und Ligament mit Knochen | 449 |
| 21.5.2 Arten und Funktionen von Gelenken | 450 |
| Literatur | 455 |
| 22 Mechanik von Stützung und Bewegung | 457 |
| 22.1 Größe und Richtung von Kräften | 457 |
| 22.1.1 Kraftvektoren und ihre Zerlegung | 457 |
| 22.1.2 Kraftkomponenten | 459 |
| 22.2 Knochen-Muskelsysteme als Maschinen | 462 |
| 22.2.1 Hebelarme und Drehmomente | 463 |
| 22.2.2 Tatsächliche Kräfte und Hebelarme gegenüber effektiven Kräften und Hebelarmen | 463 |
| 22.2.3 Beziehungen zwischen eingeleiteter und ausgeleiteter Kraft | 464 |
| 22.2.4 Summation von Drehmomenten; Zweigelenk-Systeme | 465 |
| 22.3 Mechanik der Körperstützung | 466 |
| 22.3.1 Balance und Gegenmoment | 466 |
| 22.3.2 Bögen und Bogensaiten aus Knochen und Fasern | 467 |
| 22.3.3 Sperren, Schlingen und Schlösser | 468 |
| 22.4 Mechanik der Bewegung | 470 |
| 22.4.1 Geschwindigkeiten und Hebelarme | 470 |
| 22.4.2 Masse und Beschleunigung | 471 |
| 22.4.3 Krummlinige Bewegung und Rotation | 472 |
| 22.5 Freikörperdiagramme | 473 |
| Literatur | 474 |

| | | |
|--|---|-----|
| 23 | Form, Funktion und Körpergröße | 477 |
| 23.1 | Proportionales Wachstum und Oberflächen-zu-Volumen-Verhältnis | 477 |
| 23.2 | Nichtproportionales Wachstum | 478 |
| 23.3 | Allometrie | 479 |
| 23.4 | Miniaturen und Giganten | 481 |
| Exkurs 23.1. Die Debatte über den Stoffwechsel der Dinosaurier | | 483 |
| Literatur | | 484 |
| 24 | Rennen und Springen | 485 |
| 24.1 | Vorteile von Schnelligkeit und Ausdauer | 486 |
| 24.2 | Lauftiere, Springer und ihre Fähigkeiten | 486 |
| 24.2.1 | Schnelligkeit | 486 |
| 24.2.2 | Ausdauer | 487 |
| 24.2.3 | Springfähigkeit | 489 |
| 24.2.4 | Beschleunigung und Wendigkeit | 489 |
| 24.3 | Allgemeine Anforderungen an Lauftiere | 489 |
| 24.4 | Strecke pro Zyklus | 489 |
| 24.4.1 | Länge und Proportionen der Beine | 489 |
| 24.4.2 | Fußhaltung | 491 |
| 24.4.3 | Rolle der Schulter | 491 |
| 24.4.4 | Rolle der Wirbelsäule | 491 |
| 24.4.5 | Nichtunterstützte Bewegungsphasen | 493 |
| 24.4.6 | Muskelmechanik: Die meiste Bewegung für die geringste Verkürzung | 493 |
| 24.5 | Schrittfrequenz | 494 |
| 24.5.1 | Frequenz der Muskelkontraktion | 494 |
| 24.5.2 | Muskelmechanik: Die höchste Geschwindigkeit für die geringste Verkürzung | 494 |
| 24.5.3 | Summation von Geschwindigkeiten | 496 |
| Exkurs 24.1. Gangschaltung? Ja, vielleicht, und es kommt darauf an | | 497 |
| 24.6 | Masse, Ausdauer und Design für Ökonomie | 498 |
| 24.7 | Beharrungsvermögen und Wendigkeit | 502 |
| 24.8 | Gangarten | 503 |
| Exkurs 24.2. Wie viele Gangarten gibt es? | | 506 |
| 24.9 | Springen und bipedes Laufen | 507 |
| Literatur | | 509 |
| 25 | Graben und Kriechen ohne Extremitäten | 511 |
| 25.1 | Vorteile des Grabens | 511 |
| 25.2 | Grabende Vertebraten | 512 |
| 25.2.1 | Agnatha und Fische | 512 |
| 25.2.2 | Amphibien | 512 |
| 25.2.3 | Reptilien und Vögel | 512 |

| | | |
|---|--|------------|
| 25.2.4 | Monotremata und Marsupialia | 512 |
| 25.2.5 | Insectivora | 513 |
| 25.2.6 | Edentata, Schuppentiere, Erdferkel und Carnivora | 513 |
| 25.2.7 | Hasenartige und Nagetiere | 513 |
| 25.3 | Allgemeine Anforderungen an Gräber | 515 |
| 25.4 | Verschiedene Arten des Grabens | 515 |
| 25.5 | Wie man Schmutz vom Mund, den Sinnesorganen und den Lungen fernhält | 517 |
| 25.6 | Manövrieren im Untergrund | 517 |
| 25.7 | Grabwerkzeuge | 518 |
| 25.8 | Konstruktionen zur Erzeugung großer äußerer Kräfte | 519 |
| 25.9 | Widerstandskräfte zwischen Boden und Körper | 525 |
| 25.10 | Transportieren und Wegschaffen von Erde | 527 |
| 25.11 | Kriechen ohne Extremitäten | 527 |
| | Literatur | 531 |
| 26 | Klettern | 533 |
| 26.1 | Vorteile des Kletterns | 533 |
| 26.2 | Kletternde Vertebraten | 533 |
| 26.2.1 | Fische und Amphibien | 533 |
| 26.2.2 | Reptilien und Vögel | 535 |
| 26.2.3 | Beuteltiere (Marsupialia) und Spitzhörnchen | 537 |
| 26.2.4 | Malayengleitflieger, Fledermäuse und Primaten | 537 |
| 26.2.5 | Edentata, Schuppentiere und Nagetiere | 537 |
| 26.2.6 | Carnivora, Schliefer, und Ungulaten | 537 |
| 26.3 | Anforderungen und grundlegende Mechanismen der Fortbewegung in drei Dimensionen | 537 |
| 26.3.1 | Die Rolle der Reibung | 538 |
| 26.3.2 | Die Rolle der Verzahnung | 540 |
| 26.3.3 | Die Rolle des Haftens | 540 |
| Exkurs 26.1. Glücklicherweise brauchen Kletterer das Phänomen der Reibung nicht verstehen, um es zu benutzen | | 541 |
| 26.4 | Anpassungen für den Vortrieb | 541 |
| 26.4.1 | Gehen, Rennen, Hüpfen und Springen | 541 |
| 26.4.2 | Greifen, Ziehen und Überbrücken | 542 |
| 26.4.3 | Hangeln | 543 |
| 26.5 | Anpassungen an das Aufrechterhalten von Kontakt mit dem Substrat | 546 |
| 26.5.1 | Festhalten | 546 |
| 26.5.2 | Balancieren, Abstützen, Polstern und Ansaugen | 546 |
| 26.5.3 | Festhängen und Einhaken | 548 |
| 26.5.4 | Haften | 549 |
| | Literatur | 549 |
| 27 | Schwimmen und Tauchen | 553 |
| 27.1 | Vorteile des Schwimmens und Tauchens | 553 |
| 27.2 | Die besonderen Fertigkeiten von Schwimmern und Tauchern | 554 |

| | | |
|--|--|-----|
| 27.2.1 | Schnelligkeit | 555 |
| 27.2.2 | Tauchen | 556 |
| 27.2.3 | Ausdauer | 557 |
| 27.2.4 | Beschleunigung und Wendigkeit | 557 |
| 27.3 | Allgemeine Anforderungen an Schwimmer und Taucher | 557 |
| 27.4 | Wasserwiderstand | 558 |
| 27.4.1 | Ursprung und Natur des Wasserwiderstandes | 558 |
| 27.4.2 | Reduktion von Strömungswiderstand durch Adaptationen der Körperform | 561 |
| 27.4.3 | Verminderung des Wasserwiderstandes durch geeignete Körperoberflächen und Verhalten | 562 |
| 27.5 | Form, Funktion und Art des Vortriebs | 563 |
| 27.5.1 | Quelle der Vortriebskraft | 563 |
| 27.5.2 | Undulierender Vortrieb, wandernde Wellenbewegung | 563 |
| 27.5.3 | Oszillierender Antrieb durch Paddeln | 569 |
| 27.5.4 | Kraftfreies Schwimmen (<i>Freeloading</i>) | 573 |
| 27.6 | Kontrolle der Position in der Vertikalen | 574 |
| 27.7 | Stabilität, Bremsen und Steuern | 574 |
| 27.8 | Andere Merkmale sekundärer Schwimmer | 577 |
| 27.8.1 | Schutz von Haut, Ohren und Atmungssystem | 577 |
| 27.8.2 | Anpassungen der Sinnesorgane | 578 |
| 27.8.3 | Thermoregulation und Reaktionen des Kreislaufsystems | 579 |
| Exkurs 27.1. Neue Ansichten über die Evolution und Funktion der Schwanzflosse | | 580 |
| 27.8.4 | Reproduktionsbiologie | 581 |
| | Literatur | 581 |

| | | |
|-----------|--|------------|
| 28 | Fliegen und Gleiten | 583 |
| 28.1 | Ursprung und Vorteile von Fliegen und Gleiten | 583 |
| 28.2 | Fallschirmspringende und gleitende Wirbeltiere | 584 |
| 28.3 | Flieger und Fertigkeiten | 587 |
| 28.3.1 | Schnelligkeit | 589 |
| 28.3.2 | Ausdauer | 589 |
| 28.3.3 | Flughöhe und Tragfähigkeit | 589 |
| 28.3.4 | Beschleunigung und Wendigkeit | 589 |
| 28.4 | Allgemeine Bedürfnisse von Fliegern | 589 |
| 28.5 | Wichtiges über den dynamischen Auftrieb | 590 |
| 28.6 | Luftwiderstand | 593 |
| 28.7 | Vortrieb | 595 |
| 28.7.1 | Gleitflug und Segeln | 595 |
| 28.7.2 | Einführung in den Schlagflug | 597 |
| 28.7.3 | Muskeln für den Abschlag und den Aufschlag | 598 |
| 28.7.4 | Rüttelflug | 599 |
| 28.7.5 | Flächenbelastung | 600 |
| 28.7.6 | Langsamer Steig- und Sinkflug | 600 |
| 28.7.7 | Schneller Horizontalflug | 602 |
| 28.7.8 | Theorie der Wirbelbildung | 602 |

| | | |
|---|--|-----|
| Exkurs 28.1. Der nachlaufende Wirbel und die Analyse der „Gangarten“ bei Fliegern | | 603 |
| 28.8 | Kontrolle des Fluges | 604 |
| 28.8.1 | Stabilität und Manövrierfähigkeit | 604 |
| 28.8.2 | Bremsen und Kurvenfliegen | 605 |
| 28.9 | Flügelstruktur | 607 |
| 28.10 | Weitere morphologische und physiologische Anpassungen | 609 |
| | Literatur | 612 |
| 29 | Energetik und Fortbewegung | 615 |
| 29.1 | Einige grundlegende Zusammenhänge | 615 |
| Exkurs 29.1. Symmorphose: Das Abwägen von Design und Kosten | | 617 |
| 29.2 | Fortbewegung am Boden | 617 |
| 29.2.1 | Nutzung von Energie | 617 |
| 29.2.2 | Umwandeln und Erhalten von Energie | 618 |
| 29.2.3 | Morphologische Korrelate zum Energieerhalt | 620 |
| 29.3 | Schwimmen | 621 |
| 29.4 | Fliegen | 622 |
| 29.5 | Skalierung der Fortbewegungskosten | 623 |
| | Literatur | 623 |
| 30 | Nahrungsaufnahme | 625 |
| 30.1 | Nahrungsaufnahme im Wasser | 626 |
| 30.1.1 | Filtrieren | 626 |
| Exkurs 30.1. Das Intervall-Filtrieren (Schluckfiltrieren) | | 628 |
| 30.1.2 | Saugschnappen | 629 |
| 30.1.3 | Vorstülpfen des Kiefers | 630 |
| 30.2 | Schädelkinetik | 633 |
| 30.3 | Nahrungsaufnahme durch Vorschnellen („Geschossfresser“) | 634 |
| Exkurs 30.2. Sturztauchende Vögel haben bemerkenswerte Computerprogramme | | 636 |
| 30.4 | Andere Möglichkeiten, der Nahrung habhaft zu werden | 639 |
| 30.5 | Nahrungsmanipulation und Transport | 641 |
| 30.5.1 | Linguale Nahrungsaufnahme und der Kauzyklus | 641 |
| 30.5.2 | Nahrungsaufnahme durch Trägheit | 642 |
| 30.6 | Anpassungen an das Fressen weicher, zäher Nahrung | 643 |
| Exkurs 30.3. Was haben die Säbelzahnkatzen mit diesen Messern bloß gemacht? | | 645 |
| 30.7 | Anpassungen an das Fressen praller, spröder und vielfältiger Nahrung | 646 |
| 30.8 | Anpassungen an das Fressen zäher, faserreicher Nahrung | 647 |
| 30.8.1 | Strukturen, die durchtrennen und abschneiden | 647 |

| | | |
|-----------|---|------------|
| 30.8.2 | Mahlzähne | 648 |
| 30.8.3 | Kiefermechanismen | 650 |
| 30.9 | Andere Adaptationen an die Nahrungsaufnahme | 652 |
| 30.9.1 | Verschlingen von Fisch und anderer großer Beute | 652 |
| 30.9.2 | Langsames Schlucken großer Beute | 653 |
| 30.9.3 | Zerdrücken und Zerbrechen | 654 |
| 30.9.4 | Weitere Nahrungsmittel | 655 |
| | Literatur | 657 |
| 31 | Appendix: Anatomische Präparationen | 659 |
| 31.1 | Das Reinigen von Schädeln und Skeletten | 660 |
| 31.1.1 | Reinigen durch Kochen | 660 |
| 31.1.2 | Reinigen durch Mazerieren | 661 |
| 31.1.3 | Reinigung mit Käfern | 662 |
| 31.2 | Entfetten | 663 |
| 31.3 | Bleichen | 664 |
| 31.4 | Schneiden von Knochen und Zähnen | 664 |
| 31.5 | Kleben und Zusammensetzen | 664 |
| 31.6 | Knochen-Ligament-Präparationen | 665 |
| 31.7 | Knochen-Muskel-Präparationen | 666 |
| 31.8 | Lufttrocknen hohler Eingeweide | 667 |
| 31.9 | Begasung | 667 |
| 31.10 | Färben der Skelette von Wholemounds | 668 |
| 31.11 | Andere Techniken | 670 |
| | Literatur | 670 |
| | Glossar | 673 |
| | Sachverzeichnis | 691 |