

Inhaltsverzeichnis

Vorwort *xi*

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Kräfte in der Biologie | 1 |
| 1.1 | Woraus bestehen wir? | 1 |
| 1.2 | Kräfte und der menschliche Körper | 2 |
| 1.2.1 | Schwerkraft und hydrodynamische Kraft | 2 |
| 1.2.2 | Reibungskoeffizienten | 4 |
| 1.3 | Der große Bruder: Biomechanik | 4 |
| 1.4 | Molekulare Grundlagen biologischer Konstruktionen | 6 |
| 1.5 | Weiche und harte Materialien | 9 |
| 1.6 | Biologische und biomimetische Strukturmaterialien | 13 |
| 1.7 | Abnutzung von biologischen Strukturen | 13 |
| 1.8 | Thermodynamik und Mechanik in der Biologie im Nanometermaßstab | 16 |
| | Literaturverzeichnis | 17 |
| | | |
| 2 | Einführung in die Grundlagen der Mechanik | 19 |
| 2.1 | Elastische und plastische Verformung | 19 |
| 2.2 | Der Zusammenhang zwischen Spannung und Dehnung | 20 |
| 2.3 | Mechanisches Versagen von Materialien | 21 |
| 2.4 | Viskoelastizität | 22 |
| 2.5 | Mechanische Moduln von biologischen Materialien | 24 |
| 2.5.1 | Mechanische Verformungen | 24 |
| 2.5.2 | Scherung und Schubmodul | 24 |
| 2.5.3 | Dreiaxige Verformung und Kompressibilität | 25 |
| 2.5.4 | ν , G und K hängen über die Poissonzahl zusammen | 25 |
| 2.5.5 | Was ist die Poissonzahl? | 28 |
| 2.6 | Flüssigkeiten und Viskosität | 28 |
| 2.7 | Adhäsion und Reibung | 29 |
| 2.8 | Mechanisch geregelte Systeme | 31 |
| | Literaturverzeichnis | 33 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 3 | Kräfte und Kraftmessung | 35 |
| 3.1 | Mechanische, thermische und chemische Kräfte | 35 |
| 3.2 | Die optische Pinzette | 36 |
| 3.3 | Das Rasterkraftmikroskop | 39 |
| 3.3.1 | Geschichte und Funktionsweise | 39 |
| 3.3.2 | Kraftmessung mit dem Rasterkraftmikroskop | 40 |
| 3.4 | Biomembranen als Kraftsonden | 44 |
| 3.4.1 | Kraftübertragung | 44 |
| 3.5 | Magnetische Perlen | 45 |
| 3.6 | Gelsäulen | 46 |
| 3.7 | Blattfedern als Kraftsensoren | 46 |
| 3.8 | Die Geschwindigkeit der Belastung | 47 |
| 3.8.1 | Die Abhängigkeit der mittleren Bruchkraft von der Geschwindigkeit der Belastung | 49 |
| 3.9 | Die Kraftklemmenmethode | 52 |
| 3.10 | Spezifische und unspezifische Kräfte | 52 |
| | Literaturverzeichnis | 54 |
| 4 | Die Mechanik von Polymerketten | 57 |
| 4.1 | Polymere in der Biologie | 57 |
| 4.2 | Polymerketten | 58 |
| 4.3 | Der End-zu-End-Abstand | 61 |
| 4.3.1 | Definition | 61 |
| 4.3.2 | Statistische Knäuel | 62 |
| 4.3.3 | Die frei bewegliche Kette | 63 |
| 4.4 | Die Persistenzlänge | 65 |
| 4.4.1 | Auswirkung von Vernetzungen | 67 |
| 4.5 | Polymere in Lösung | 67 |
| 4.5.1 | Allgemeines | 67 |
| 4.5.2 | Denaturierte Proteine und DNA | 68 |
| 4.6 | Polymere auf Oberflächen | 68 |
| 4.7 | Polymere als biomimetische Materialien | 69 |
| 4.8 | Ziehen von Polymeren | 70 |
| | Literaturverzeichnis | 71 |
| 5 | Wechselwirkungen | 73 |
| 5.1 | Kovalente und nichtkovalente Wechselwirkungen | 73 |
| 5.2 | Die Grundlagen der elektrostatischen Wechselwirkung | 74 |
| 5.3 | Verschiedene Arten von nichtkovalenten Kräften | 75 |
| 5.3.1 | Wechselwirkungen zwischen Ladungen | 75 |
| 5.3.2 | Wechselwirkungen zwischen Ladungen und Dipolen | 76 |
| 5.3.3 | Wechselwirkungen zwischen permanenten Dipolen | 76 |

- 5.3.4 Wechselwirkungen zwischen permanenten und induzierten Dipolen 77
- 5.3.5 Die Dispersionswechselwirkung 77
- 5.3.6 Wasserstoffbrückenbindungen 78
- 5.3.7 Die hydrophobe Wechselwirkung 79
- 5.4 Anwendung einer äußeren Kraft 81
- 5.5 Wechselwirkungen zwischen Makromolekülen 82
 - 5.5.1 Der Ausschlusseffekt 82
 - 5.5.2 Der Verarmungseffekt 82
- 5.6 Wasser an Grenzflächen 83
- Literaturverzeichnis 85

- 6 Wechselwirkungen zwischen einzelnen Molekülen 87**
 - 6.1 Ligand-Rezeptor-Wechselwirkungen 87
 - 6.1.1 Die Wechselwirkung zwischen Biotin und Avidin 87
 - 6.1.2 Wechselwirkungen von Fusionsproteinen der synaptischen Vesikel 91
 - 6.1.3 Die Wechselwirkung zwischen Transferrin und seinem Membranrezeptor 91
 - 6.2 Zucker-Lektin-Wechselwirkungen 92
 - 6.3 Antigen-Antikörper-Wechselwirkungen 92
 - 6.4 Die Wechselwirkung zwischen GroEL und entfalteten Proteinen 93
 - 6.5 Lipid-Protein-Wechselwirkungen 95
 - 6.6 Die Verankerung von Proteinen an Membranen 96
 - 6.7 Die Kartierung von Rezeptoren 97
 - 6.8 Die Ablösung und Identifikation von Proteinen 99
 - 6.9 Die Zerstörung von Membranen 101
 - Literaturverzeichnis 102

- 7 Die Mechanik einzelner DNA- und RNA-Moleküle 105**
 - 7.1 Dehnung doppelstrangiger DNA 105
 - 7.2 Hybridisierung und mechanische Kräfte 107
 - 7.3 Die Dynamik von DNA- und RNA-Ketten: Phasenübergänge 108
 - 7.4 Wechselwirkungen zwischen DNA und Proteinen 109
 - 7.5 Ausblick: Sequenzanalyse 111
 - Literaturverzeichnis 111

- 8 Die Mechanik einzelner Proteinmoleküle 113**
 - 8.1 Die Streckung von Proteinen 113
 - 8.2 Proteinkerne 117
 - 8.3 Streckung von modularen Proteinen 119
 - 8.4 Dynamische Streckung 121
 - 8.5 Die Fangbindung 122

| | | |
|-----------|---|------------|
| 8.6 | Die Stauchung von Proteinen | 123 |
| 8.6.1 | Das Hertzmodell | 123 |
| 8.6.2 | Das Tataramodell | 126 |
| 8.7 | Innere Mechanik von Proteinmolekülen | 128 |
| 8.8 | Mechanische Steuerung der Proteinaktivität | 129 |
| 8.9 | Computersimulation der Deformation von Proteinen | 129 |
| 8.10 | Fallstudie: Carboanhydrase II | 131 |
| | <i>Rehana Afrin</i> | |
| 8.10.1 | Molekülstruktur | 131 |
| 8.10.2 | Biologische Funktion | 132 |
| 8.10.3 | Untersuchungen zur Entfaltung | 132 |
| 8.10.4 | Mechanische Streckung von den Kettenenden aus | 132 |
| 8.10.5 | Knotenfreie Streckung: Typ-I und Typ-II-Konformere | 134 |
| 8.10.6 | Die Bindung von Inhibitoren | 136 |
| 8.10.7 | Streckung partiell denaturierter Proteine | 136 |
| 8.10.8 | Bestimmung des Elastizitätsmoduls aus Kompressionsexperimenten | 137 |
| | Literaturverzeichnis | 138 |
| 9 | Bewegung in der Nanobiologie | 143 |
| 9.1 | Zellbewegung und Strukturproteine | 143 |
| 9.2 | Muskel- und Motorproteine | 145 |
| 9.3 | Messungen an einzelnen Motorproteinen | 147 |
| 9.4 | Geißeln zur Fortbewegung von Bakterien | 148 |
| 9.5 | Die Gleitbewegung von Mykoplasmen | 148 |
| 9.6 | Der Wirkungsgrad von Motorproteinen | 150 |
| | Literaturverzeichnis | 150 |
| 10 | Die Mechanik von Zellen | 153 |
| 10.1 | Formänderungen von roten Blutkörperchen | 153 |
| 10.2 | Membran und Zytoskelett | 154 |
| 10.3 | Die Verbindung der Membranproteine mit dem Zytoskelett | 158 |
| 10.3.1 | Behandlung mit Detergenzien | 158 |
| 10.3.2 | Diffusionskoeffizienten | 158 |
| 10.3.3 | Messung von Kraftkurven | 159 |
| 10.4 | Deformation einer zweidimensionalen Membran | 159 |
| 10.5 | Die Helfrichtheorie der Membranmechanik | 162 |
| 10.6 | Zytoplasma und subzelluläre Strukturen | 163 |
| 10.7 | Mechanische Eindrückung und die sneddonschen Gleichungen | 165 |
| 10.7.1 | Die sneddonschen Gleichungen | 165 |
| 10.7.2 | Korrektur für dünne Proben | 167 |
| 10.8 | Die Mechanik der Deformation einer dünnen Platte | 168 |
| | Literaturverzeichnis | 170 |

| | | |
|-----------|--|------------|
| 11 | Manipulation einzelner Moleküle | 173 |
| 11.1 | Zukunftsmusik: Praktische Anwendungen der Nanomechanik | 173 |
| 11.2 | Operationen an Zellen | 173 |
| 11.3 | Operationen an Chromosomen und Genmanipulationen | 174 |
| 11.4 | Operationen an Geweben | 175 |
| 11.5 | Liposomtechnologie | 175 |
| 11.6 | Freisetzung von Wirkstoffen | 177 |
| 11.7 | Gewinnung von DNA und RNA aus Chromosomen und Zellen | 178 |
| | Literaturverzeichnis | 180 |
| 12 | Finite-Elemente-Analyse von mikroskopischen biologischen Strukturen | 183 |
| | <i>Sandor Kasas, Thomas Gmür, Giovanni Dietler</i> | |
| 12.1 | Einführung | 183 |
| 12.2 | Eine kurze Geschichte der Finite-Elemente-Methode | 183 |
| 12.3 | Die Finite-Elemente-Methode | 185 |
| 12.4 | Anwendung der FEM auf mikrobiologische Proben | 187 |
| 12.4.1 | Proteine | 187 |
| 12.4.2 | Axoneme und Zilien | 190 |
| 12.4.3 | Zellkerne | 192 |
| 12.4.4 | Mikroorganismen | 192 |
| 12.4.5 | Einzelne Zellen | 193 |
| 12.4.6 | Embryologie und Zellteilung | 195 |
| 12.5 | Zusammenfassung | 198 |
| | Literaturverzeichnis | 199 |
| A | Grundzüge der linearen Mechanik nach Landau und Lifschitz | 205 |
| | Literaturverzeichnis | 206 |
| B | Die Mechanik von Balken | 207 |
| B.1 | Biegung | 207 |
| B.1.1 | Beidseitig unterstützter Balken | 207 |
| B.1.2 | Frei tragender Ausleger | 212 |
| B.1.3 | Verteilte Last | 212 |
| B.1.4 | Krümmungsradius | 214 |
| B.2 | Knickung | 216 |
| B.3 | V-förmige Ausleger | 218 |
| | Literaturverzeichnis | 219 |
| C | Persistenzlänge und Kuhnlänge | 221 |

| | | |
|----------|--------------------------------------|------------|
| D | Das Hertzmodell | 223 |
| D.1 | Punktlast | 223 |
| D.2 | Verteilte Last | 223 |
| D.2.1 | Hertzdruck ($n = 1/2$) | 225 |
| D.2.2 | Die Integration von Gleichung (D.10) | 226 |
| D.3 | Zwei Kugeln im Kontakt | 228 |
| | Literaturverzeichnis | 231 |
| E | Farbtafeln | 233 |
| F | Index | 241 |