

Wissenschaftliche Taschenbücher

**WTB**

**Biologie**

**Grundriß  
der Biomechanik**

WTB

---

BAND 286

*Roland Glaser*

# Grundriß der Biomechanik

Mit 65 Abbildungen und 7 Tabellen



AKADEMIE-VERLAG · BERLIN

## *Reihe* BIOLOGIE

Herausgeber:

Prof. Dr. H. Bochow, Berlin  
Prof. Dr. H. Böhme, Gatersleben  
Prof. Dr. H. Borriss, Greifswald  
Prof. Dr. E. Hofmann, Leipzig  
Prof. Dr. J. O. Hüsing, Rerik  
Prof. Dr. U. Taubeneck, Jena

Verantwortlicher Herausgeber dieses Bandes:

**Prof. Dr. J. O. Hüsing**

Verfasser:

**Prof. Dr. Roland Glaser**

Berlin

1983

Erschienen im Akademie-Verlag, DDR - 1086 Berlin, Leipziger Str. 3-4

© Akademie-Verlag Berlin 1983

Lizenznummer: 202 · 100/424/83

Printed in the German Democratic Republic

Herstellung: VEB Druckhaus „Maxim Gorki“, 7400 Altenburg

Lektor: Renate Trautmann

Hersteller: Per Leonhardt

LSV 1314

Bestellnummer: 763 154 7 (7286)

DDR 12,50 M

ISSN 0084-0963

## Inhaltsverzeichnis

Vorwort . . . . .	7
1. Aufgaben und Ziele der Biomechanik . . . . .	9
2. Meßgrößen, dimensionslose Parameter, Ähnlichkeitsanalyse . . . . .	13
2.1. Grundlegendes zu physikalischen Meßgrößen . . . . .	13
2.2. Geometrische und physikalische Ähnlichkeiten . . . . .	14
2.3. Ähnlichkeitsanalyse biologischer Systeme . . . . .	16
3. Festkörpereigenschaften biologischer Materialien . . . . .	19
3.1. Prinzipielle Verformungsarten . . . . .	19
3.2. Elastizität . . . . .	20
3.3. Kinetik des Dehnungsvorganges — viskoelastisches Verhalten . . . . .	22
3.4. Viskoelastisches Verhalten biologischer Materialien . . . . .	26
4. Grundzüge der Biostatik . . . . .	30
4.1. Biegungs-, Torsions-, Schlagfestigkeit — physikalische Grundlagen . . . . .	30
4.2. Biostatik der Pflanzen . . . . .	35
4.3. Biostatik des tierischen Körperbaues . . . . .	37
5. Biomechanik kontraktiler Elemente — Erzeugung mechanischer Energie . . . . .	43
5.1. Molekularstruktur und Funktionsweise des quergestreiften Muskels . . . . .	43
5.2. Zur Phänomenologie der Muskelkontraktion . . . . .	46
5.3. Bewegungsabläufe bei Wirbeltieren . . . . .	49
6. Eigenschaften flüssiger Biomaterialien . . . . .	53
6.1. Viskosität . . . . .	53
6.2. Viskosität von Lösungen und Suspensionen . . . . .	56
6.3. Viskositätsverhalten biologischer Flüssigkeiten . . . . .	60
7. Mechanik der Zellmembran . . . . .	62
7.1. Molekularstruktur der Zellmembran . . . . .	62
7.2. Viskoelastische Eigenschaften der Zellmembran und Methoden ihrer Messung . . . . .	65
7.3. Membranmechanik und Zellform . . . . .	71

8.	Strömungen im Körperinneren — Grundlagen der Hämorheologie . . . . .	78
8.1.	Viskositätseigenschaften des Blutes . . . . .	78
8.2.	Zur Hydrodynamik der Strömung in Röhren . . . . .	82
8.3.	Hämorheologie des Blutkreislaufes. . . . .	89
8.4.	Das Herz als Pumpe . . . . .	96
9.	Strömungen an der Körperoberfläche — zur Biomechanik von Fliegen und Schwimmen . . . . .	99
9.1.	Umströmung des Körpers . . . . .	99
9.2.	Schwimmen . . . . .	108
9.3.	Fliegen . . . . .	111
10.	Mechanische Schwingungen . . . . .	115
10.1.	Zur Biomechanik des Hörens . . . . .	116
10.2.	Ultraschall . . . . .	125
11.	Literaturverzeichnis . . . . .	128
12.	Sachverzeichnis . . . . .	132

Wissenschaftliche Taschenbücher

**WTB**

**Biologie**

**Grundriß  
der Biomechanik**



WTB

BAND 286

*Roland Glaser*

# Grundriß der Biomechanik

Mit 65 Abbildungen und 7 Tabellen



AKADEMIE-VERLAG · BERLIN

## *Reihe* BIOLOGIE

Herausgeber:

Prof. Dr. H. Bochow, Berlin  
Prof. Dr. H. Böhme, Gatersleben  
Prof. Dr. H. Borriss, Greifswald  
Prof. Dr. E. Hofmann, Leipzig  
Prof. Dr. J. O. Hüsing, Rerik  
Prof. Dr. U. Taubeneck, Jena

Verantwortlicher Herausgeber dieses Bandes:

**Prof. Dr. J. O. Hüsing**

Verfasser:

**Prof. Dr. Roland Glaser**

Berlin

1983

Erschienen im Akademie-Verlag, DDR - 1086 Berlin, Leipziger Str. 3-4

© Akademie-Verlag Berlin 1983

Lizenznummer: 202 · 100/424/83

Printed in the German Democratic Republic

Herstellung: VEB Druckhaus „Maxim Gorki“, 7400 Altenburg

Lektor: Renate Trautmann

Hersteller: Per Leonhardt

LSV 1314

Bestellnummer: 763 154 7 (7286)

DDR 12,50 M

ISSN 0084-0963

## Inhaltsverzeichnis

Vorwort . . . . .	7
1. Aufgaben und Ziele der Biomechanik . . . . .	9
2. Meßgrößen, dimensionslose Parameter, Ähnlichkeitsanalyse . . . . .	13
2.1. Grundlegendes zu physikalischen Meßgrößen . . . . .	13
2.2. Geometrische und physikalische Ähnlichkeiten . . . . .	14
2.3. Ähnlichkeitsanalyse biologischer Systeme . . . . .	16
3. Festkörpereigenschaften biologischer Materialien . . . . .	19
3.1. Prinzipielle Verformungsarten . . . . .	19
3.2. Elastizität . . . . .	20
3.3. Kinetik des Dehnungsvorganges — viskoelastisches Verhalten . . . . .	22
3.4. Viskoelastisches Verhalten biologischer Materialien . . . . .	26
4. Grundzüge der Biostatik . . . . .	30
4.1. Biegungs-, Torsions-, Schlagfestigkeit — physikalische Grundlagen . . . . .	30
4.2. Biostatik der Pflanzen . . . . .	35
4.3. Biostatik des tierischen Körperbaues . . . . .	37
5. Biomechanik kontraktiler Elemente — Erzeugung mechanischer Energie . . . . .	43
5.1. Molekularstruktur und Funktionsweise des quergestreiften Muskels . . . . .	43
5.2. Zur Phänomenologie der Muskelkontraktion . . . . .	46
5.3. Bewegungsabläufe bei Wirbeltieren . . . . .	49
6. Eigenschaften flüssiger Biomaterialien . . . . .	53
6.1. Viskosität . . . . .	53
6.2. Viskosität von Lösungen und Suspensionen . . . . .	56
6.3. Viskositätsverhalten biologischer Flüssigkeiten . . . . .	60
7. Mechanik der Zellmembran . . . . .	62
7.1. Molekularstruktur der Zellmembran . . . . .	62
7.2. Viskoelastische Eigenschaften der Zellmembran und Methoden ihrer Messung . . . . .	65
7.3. Membranmechanik und Zellform . . . . .	71

8.	Strömungen im Körperinneren — Grundlagen der Hämorheologie . . . . .	78
8.1.	Viskositätseigenschaften des Blutes . . . . .	78
8.2.	Zur Hydrodynamik der Strömung in Röhren . . . . .	82
8.3.	Hämorheologie des Blutkreislaufes. . . . .	89
8.4.	Das Herz als Pumpe . . . . .	96
9.	Strömungen an der Körperoberfläche — zur Biomechanik von Fliegen und Schwimmen . . . . .	99
9.1.	Umströmung des Körpers . . . . .	99
9.2.	Schwimmen . . . . .	108
9.3.	Fliegen . . . . .	111
10.	Mechanische Schwingungen . . . . .	115
10.1.	Zur Biomechanik des Hörens . . . . .	116
10.2.	Ultraschall . . . . .	125
11.	Literaturverzeichnis . . . . .	128
12.	Sachverzeichnis . . . . .	132

*Überhaupt bleibt hier dem sinnigen, von höherem Geiste beseelten Physiker und Mechaniker noch ein weites Feld offen, und ich glaube, daß bei dem Schwunge, den die Naturwissenschaft erhalten, auch tieferes Forschen in das heilige Geheimnis der Natur eindringen, und manches, was nur noch geahnet, in das rege Leben sichtlich und vernehmbar bringen wird.*

E. T. A. HOFFMANN

Aus: „Die Automate“

## Vorwort

Dieses Buch ist das Produkt einer sechsjährigen Vorlesungstätigkeit im Fachstudium Biophysik. Eine Vorlesung ist sicher der beste Weg, um ein Fachgebiet zu sichten, wiederholt kritisch zu durchdenken, Akzente zu setzen und Proportionen zu umreißen. Vielleicht ist das hier vorgestellte Material nützlich für Biophysiker und Physiologen, vielleicht vermittelt es dem Physiker Anregungen und ein Gefühl für die große Ausstrahlungskraft seines Faches.

Eine Disziplin wächst nicht nur mit der Anzahl der erforschten Fakten. Sie bedarf auch einer inneren Struktur, die die Einordnung des Materials und, mehr noch, das Knüpfen innerer Zusammenhänge erlaubt. Schon immer haben Monographien und Lehrbücher diese Funktion zu erfüllen versucht, und so ist auch das Bemühen zu verstehen, einen „Grundriß der Biomechanik“ zu entwerfen. Es gibt viele Bücher, die weit ausführlicher Teilgebiete dieser Disziplin darstellen, geschrieben von Spezialisten, die selber Pionierarbeit in der Forschung geleistet haben. Darüber hinaus ist jedoch eine Gesamtschau wichtig, die dem Studierenden den Weg weist und ihm Einsichten in generelle Aspekte und große Zusammenhänge erlaubt.

Dieser Grundriß leitet seine Proportion nicht von der Fülle des Vorhandenen ab, sondern sucht sie der sinnvollen Notwendigkeit anzugleichen. Der Autor ist sich der Problematik eines solchen Vorgehens voll bewußt. Er hat beispielsweise die große Fülle an Untersuchungen zum Vogelflug bewußt zugunsten hämorrheologischer Sachverhalte zurückgedrängt und nicht darauf verzichtet, auch der zellulären Mechanik Aufmerksamkeit zu schenken, obgleich unsere Kenntnis darüber zur Zeit noch sehr lückenhaft ist. Manches mußte aus Mangel an Substanz ausgelassen werden. Auch ist Vollständigkeit der Literaturzitate nicht angestrebt worden. Es sind vorwiegend neueste Arbeiten zitiert, die als Schlüsselpublikationen dienen können und dem Interessenten möglicherweise weiter-

helfen. Selbstverständlich sind darüber hinaus Werke genannt, die auch heute noch zum tieferen Eindringen in den Stoff unentbehrlich sind, obgleich ihr Publikationsdatum schon etwas weiter zurückliegt.

Es ist dem Autor ein Bedürfnis, sich bei denen zu bedanken, die ihm bei der Zusammenstellung dieses Bändchens geholfen haben. Neben zahlreichen Studenten, die durch Fragen und Diskussionen in den Vorlesungen zur Klärung vieler Sachverhalte beitrugen, gilt mein besonderer Dank meinem wissenschaftlichen Mitarbeiter, Herrn Dr. INGOLF BERNHARDT, für die wissenschaftliche Durchsicht des Manuskriptes sowie Frau JUTTA DONATH und Fräulein CORINNA GENGNAGEL für Unterstützung bei seiner technischen Fertigstellung. An dieser Stelle sei mir auch ein Dank an die Rezensenten des Manuskriptes gestattet, die wesentliche Hinweise zu Korrektur und Verbesserung gaben. Viele Druck- und Formfehler wären noch verblieben, hätte sich nicht die Lektorin des Buches, Frau RENATE TRAUTMANN, dem Manuskript mit außergewöhnlicher Sorgfalt gewidmet. Mein Dank an sie und die anderen Mitarbeiter des Verlages sei hier zum Ausdruck gebracht.

Berlin, im Februar 1982

ROLAND GLASER

## 1. Aufgaben und Ziele der Biomechanik

Die Biomechanik ist das älteste Gebiet der Biophysik. Ihr Gegenstand ist die Wirkung mechanischer Gesetzmäßigkeiten in biologischen Systemen und die Antwort dieser Systeme auf mechanische Einflüsse der Umwelt. Da die Mechanik den Anfang der Physik überhaupt kennzeichnet, verwundert es nicht, daß biomechanische Forschung bereits in frühen Epochen der Wissenschaftsgeschichte einsetzte. Diese Untersuchungen sind natürlich von physiologischen und anatomischen Studien nicht zu trennen, wie auch heute eine scharfe Trennlinie zwischen diesen Disziplinen kaum zu ziehen ist. Wenn in diesem Zusammenhang das im 17. Jahrhundert erschienene Werk von BORELLI: „De motu animalium“ [13] genannt wird (Abb. 1), so soll es lediglich stellvertretend für viele andere, auch frühere Versuche stehen, Körperfunktionen auf der Basis mechanischer Gesetzmäßigkeiten zu erklären. Bekanntlich hat bereits LEONARDO DA VINCI (1452—1519) viele Notizen zur Mechanik von Flug- und Schreitbewegungen hinterlassen, zumeist mit Bezügen auf mögliche technische Nutzung. Erst der Aufschwung der Mechanik durch GALILEO GALILEI (1564—1642) und ISAAK NEWTON (1643—1727) eröffnete der Biomechanik neue Möglichkeiten.

Wie in jeder Wissenschaft haben auch in der Biomechanik im wesentlichen zwei Triebfedern die Entwicklung getragen: der durch die schöpferische Neugier getriebene reine Forscherdrang und die durch gesellschaftliche Bedürfnisse induzierte Zweckforschung. Diese beiden, natürlich nicht als Alternativen zu betrachtenden, Tendenzen sind vielleicht in der Biomechanik besonders deutlich. Die ins Auge fallende Vielgestaltigkeit mechanischer Bewegungsabläufe im Tierreich und die Statik von Tier und Pflanze regte zu vielen Untersuchungen an, deren Bedeutung zunächst nicht auf der Hand liegt. In diesem Zusammenhang sind Untersuchungen über Gelenkmechanismen und Bewegungsabläufe bei Insekten zu nennen, Studien zur Mechanik der Fortbewegung des Regenwurmes und vieles andere mehr. Solche Untersuchungen

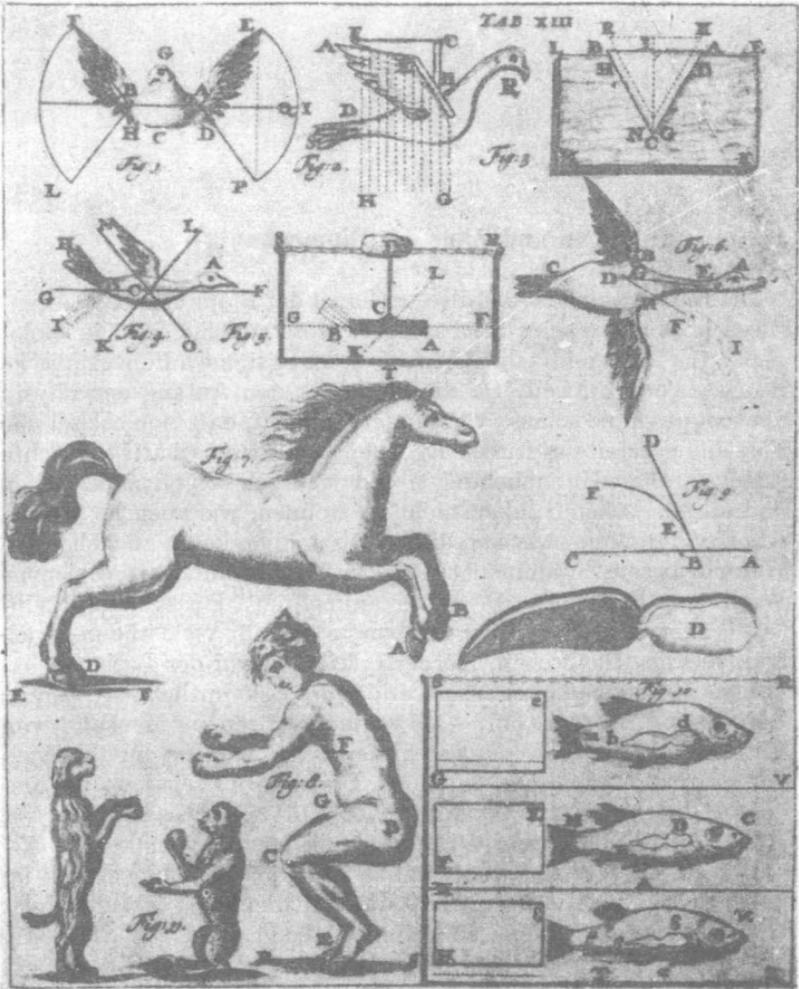


Abb. 1. Darstellung verschiedener Bewegungsformen aus dem Werk von G. A. BORELLI: "De motu animalium" [13]

sind interessant und sicherlich nicht unbedeutend für die Wissenschaftsentwicklung; sie werden jedoch in letzter Zeit mehr und mehr durch Forschungsaufgaben ersetzt, die eine stärkere Bezogenheit auf Probleme des Gesundheitswesens, aber auch anderer

Anwendungsgebiete biologischer Forschung haben. Insbesondere sind in diesem Zusammenhang die stürmische Entwicklung der Hämorheologie und der Biomaterialforschung im Interesse der Medizintechnik zu nennen. Sammelbände und Symposiumsberichte weisen auf das steigende Interesse an diesen Richtungen (z. B. [27, 36, 54, 59, 72]). Auch für die Sportmedizin gewinnen biomechanische Untersuchungen von Bewegungsabläufen Bedeutung [38].

Eine Zeitlang glaubte man, in größerem Umfang biologische Konstruktionsprinzipien in die Technik übernehmen zu können. So wurde auf einem diesbezüglichen Kongreß in Dayton (USA) im Jahre 1960 das Wort *Bionik* („Biologie“ und „Technik“) geprägt und somit das uralte Bestreben der Menschheit kanalisiert, von der Natur zu lernen. Die Erfolge dieser Bemühungen hielten sich jedoch in Grenzen und schlugen sich stärker in der populärwissenschaftlichen als in der wissenschaftlichen Literatur nieder. Eine Reihe biomechanischer Untersuchungen, hauptsächlich auf dem Gebiet der Flug- und Schwimmbewegung, wurde in diesem Zusammenhang induziert, auch Überlegungen zur Biostatik erwiesen sich als mehr oder weniger tragfähig [37]. Auf diese Bezüge wird in den entsprechenden Abschnitten dieses Buches kurz eingegangen.

Biomechanik ist nicht „Mechanik für Biologen und Mediziner“, sondern eine Ausdehnung dieser physikalischen Disziplin auf Vorgänge an biologischen Systemen mit allen ihren Besonderheiten. Prinzipiell muß man davon ausgehen, daß die funktionelle Struktur eines biologischen Systems einen *evolutionären* Optimierungsprozeß durchlaufen hat, der sich vom Optimierungsweg in der Technik wesentlich unterscheidet. Der Konstrukteur entwirft nach Vorgaben und mit Hilfe technischen Wissens ein Gerät, rechnet es durch, überprüft theoretisch seine Funktionstüchtigkeit und läßt es dann bauen. Auch wenn die Erfahrungen, die an dem ersten Muster gewonnen werden, auf die Konstruktion des verbesserten Typs zurückwirken, so ist doch die Anzahl der Rückkopplungsschleifen vernachlässigbar gering im Vergleich zu den Reproduktionszyklen biologischer Systeme. Hier erfolgt durch eine unvorstellbar große Anzahl von Generationen im Prozeß der Variation und Selektion Annäherung an ein Optimum. Dieser biologische Optimierungsprozeß ist unvergleichlich viel langsamer als der technische, zumal, im Gegensatz zu einer technischen Geräteentwicklung, die Kindergeneration nicht aus der Elternerfahrung lernt, sondern deren Eigenschaften nur unspezifisch variiert.

Die Folgen dieses evolutionären Optimierungsprozesses der belebten Natur sind aus dem Blickwinkel der Biomechanik mitunter erstaunliche konstruktive Lösungen. Nicht das (vom Standpunkt des Physikers) *Nächstliegende* ist realisiert, sondern das *entwicklungsgeschichtlich Gewachsene*, über dessen Zufälligkeit man sich noch streitet, das aber jedenfalls über geologische Zeiträume optimiert ist, falls sich nicht die Lebensbedingungen schneller geändert haben, als der Optimierungsprozeß die Anpassung realisieren konnte.

Die Besonderheiten der Mechanik von Tier und Pflanze resultieren ferner aus der hierarchischen Funktionsstruktur des biologischen Systems. Es existieren mithin funktionelle Bedingungen, die von der molekularen Ebene bis zur Funktion des Gesamtorganismus (und manchmal noch darüber hinaus) reichen. Wie später ausführlicher dargestellt wird, ist z. B. die Konstruktion des Systems der Knochenbälkchen Antwort auf die funktionelle Belastung des Skelettsystems. Die molekulare Zusammensetzung der Zellmembran erzeugt z. B. die speziellen viskoelastischen Eigenschaften der Blutzelle, die den Bedingungen des Blutkreislaufsystems Rechnung tragen. Biomechanik erfordert deshalb ein funktionelles Denken und macht notwendig, die Stellung der zu untersuchenden Komponenten im System zu beachten.

Die hierarchische Struktur des lebenden Organismus hat noch eine andere physikalische Konsequenz: Während in der Kontinuumsmechanik phänomenologische Eigenschaften definiert sind, die sich aus der Teilchenstatistik ableiten lassen, sind in biologischen Systemen molekulare Organisationsprinzipien wirksam, die dieses Prinzip durchbrechen. Die mechanischen Eigenschaften einer Zellmembran sind z. B. nicht aus den Grenzflächeneigenschaften einer Mischphase aus Proteinen und Lipiden erklärbar, sondern ergeben sich als lokale Größen durch die funktionell gesteuerte Lateralbewegung der Membrankomponenten.

Dies führt zu einer weiteren Besonderheit biophysikalischer Forschung, die sich auch in der Biomechanik widerspiegelt: Die Kleinheit biologischer Subsysteme läßt oftmals die Anwendung phänomenologischer Größen fraglich erscheinen. Dies betrifft beispielsweise Parameter wie Viskosität, Elastizität im oben genannten Beispiel und gilt natürlich auch für nichtmechanische Parameter wie Dielektrizitätskonstante, Konzentration, Temperatur etc.