

# BIOMECHANIK

Patrick Messner  
Medizinische Universität Innsbruck  
Wintersemester 2014/2015

Folgendes Dokument ist ausschließlich für den persönlichen Gebrauch bestimmt. Eine Weitergabe in veränderter Form, besonders die Unkenntlichmachung des Verfassers oder eine Verwertung unter finanziellen Aspekten ist verboten. Alle Bilder unterliegen geltenden Copyrightbestimmungen und sind für den privaten Gebrauch verwendet, eine darüber hinausgehende Verbreitung und Verwendung ist nicht gestattet.

## Inhaltsverzeichnis:

<b>1. Definition</b>	3
<b>2. Hebel- und Drehmoment</b>	3
2.1. Drehmoment	4
<b>3. Bezug zur Medizin</b>	5
3.1. Fragestellungen	5
3.2. Bereiche	5
3.3. Spannungsarten	5
3.4. Gelenk	5
3.5. Optimierung des Querschnittprofils	6
3.6. Was kann man gegen große Zugkräfte tun?	6
3.7. Funktionelle Anpassung	7
<b>4. Biomaterialien</b>	8
4.1. Eigenschaften und Verformbarkeit	8
4.2. Spannungs- und Dehnungs-Diagramm	9
4.3. Materialvorkommen und Funktion	10
4.4. Knochen als Verbundmaterial	11
4.5. Zwischenwirbelscheiben	11
<b>5. Quellenverzeichnis</b>	12

## 1. Definition:

Die **Biomechanik** (von griechisch βίος „Leben“ und μηχανική „Mechanik“) ist eine interdisziplinäre Wissenschaft, die den Bewegungsapparat *biologischer Systeme* und die mit ihm erzeugten *Bewegungen* unter Verwendung der Begriffe, Methoden und Gesetzmäßigkeiten der Mechanik beschreibt, untersucht und beurteilt. Sie *baut* auf den Kenntnissen von *Physik, Mathematik, Chemie, Biologie, Sportphysiologie, Neurophysiologie* und *Anatomie* auf. Untersucht wird eine große Bandbreite von Bewegungen, angefangen von der Grundlagenforschung zum menschlichen Gang über Bewegungen eines Arbeiters bis hin zu komplexen Bewegungen im Leistungssport. Dabei kommen vielfältige Methoden wie zum Beispiel verschiedene Arten der Kraftmessung, Elektromyografie, Motion Capture und Computersimulationen zum Einsatz. Anwendungsgebiete sind neben Leistungs-, Breiten- und Gesundheitssport auch Orthopädie, Gesundheitsförderung oder die Prüfung von Sportgeräten.<sup>[1]</sup>

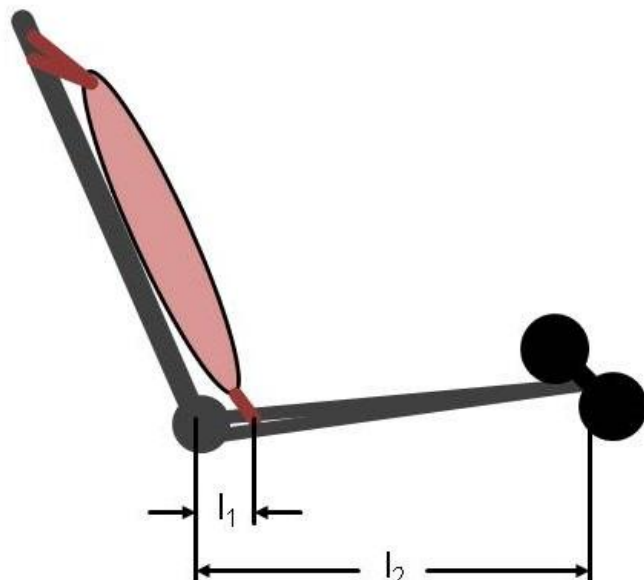
## 2. Hebel und Drehmoment:

Das menschliche Skelett besteht aus einer Vielzahl an **Hebeln**. Bestes Beispiel ist hierbei der Ober- und Unterarm inkl. *Biceps*: Dieser liegt dicht neben dem Ellenbogen am Unterarm und greift dort an. So muss seine *Muskelkraft* allerdings deutlich größer sein als die *Gewichtskraft* der Hantel, die in der Hand liegt. Somit gilt für den Bizeps: „Er sitzt am kürzeren Hebelarm“. Die einfachste Form des **Hebelgesetzes** lautet:

### Merke:

**Kraft mal Kraftarm = Last mal Lastarm**

So liegt es nahe, die *Gewichtskraft* der Hantel als „*Last*“ zu beschreiben und die *Muskelkraft* des *Musculus biceps brachii* als „*Kraft*“. Dementsprechend funktioniert es auch umgekehrt. Die Länge des Hebelarms ist der Abstand zwischen dem Angriffspunkt der jeweiligen Kraft und der Drehachse. Für den Bizeps wären das in etwa 30mm ( $l_1$ ), wohingegen der Unterarm eine Länge von ca. 30cm aufweist ( $l_2$ ).<sup>[2]</sup>



Im Gleichgewicht gilt das eben genannte Hebelgesetz. In der mathematischen Formulierung lautet diese (Kraft,  $F_1$  und Last,  $F_2$  inkl. Hebelarme  $l_1$  und  $l_2$ ):

**Merke:**

$$l_1 \cdot F_1 = l_2 \cdot F_2$$

## 2.1 Drehmoment:

Die Physik nützt die mathematische Deutung und definiert eine neue **physikalische Größe**, die als **Drehmoment** bezeichnet wird. Die Formel lautet:

**Merke:**

$$\text{Drehmoment: } T = l \times F$$

**Drehmoment: Vektorprodukt aus Hebelarm ( $l$ ) und Kraft ( $F$ )**

Cave: Hier muss beachtet werden, dass T, l und F jeweils Vektoren sind.

Das Drehmoment steht senkrecht auf l und F und liegt demzufolge parallel zur Drehachse.<sup>[2]</sup>

### 3. Bezug zur Medizin:

#### 3.1 Fragestellungen:

- Welche Materialien sind wo im Körper zu finden?
- Welche Funktionen haben die unterschiedlichen Materialien?
- Welche Struktur weisen diese Materialien auf?
- Welche molekularen Kräfte herrschen vor?
- Welche Form weisen die unterschiedlichen „Bauteile“ des Körpers auf?
- Welche besonderen Belastungen bzw. Beanspruchungen treten im Bewegungsapparat auf?
- Wie passt sich der Körper an die unterschiedlichen Anforderungen an?

#### 3.2 Bereiche:

1. Gestalt
2. Struktur
3. Materialien

#### Verbunden mit der Medizin:

- Anatomie = Gestalt + Struktur
- Histologie = Gestalt + Struktur + Materialien
- Biochemie = Materialien

#### 3.3 Spannungsarten:

- *Mechanische Spannung = Kraft pro Fläche*
- *Scherung = Kräfteverlauf quer zur Fläche*
- *Normalspannung = senkrecht zur Fläche*
- *Schubspannung = parallel zur Fläche*

#### 3.4 Gelenk:

- Ein Gelenk ist eine *bewegliche Verbindung* für **Kraftübertragung**
- Kann folgende Kräfte übertragen:
  - *Zugkräfte*
  - *Druckkräfte*
  - CAVE: jedoch keine Drehkräfte!

### 3.5 Optimierung des Querschnittsprofils:

- Erklärung anhand eines Beispiels – Brett in der Mitte (der Länge nach) durchsägen:
  - Es entstehen zwei Lamellen, die gleitfähig aufeinander gelegt werden
    - ♦ Dadurch wird die **Biegebarkeit** erhöht
  - Begründung:
    - ♦ In der *oberen Lamelle* entsteht eine **Stauchung**
    - ♦ In der *unteren Lamelle* entsteht eine **Dehnung**
    - ♦ In der Mitte befinden sich die **neutralen Fasern** (Übergang obere zur unteren Lamelle)
  - Der Abstand zu(r) neutralen Faser(n) ist bestimmend für die *Biegebarkeit!*
    - ♦ Ist das **axiale Flächenträgheitsmoment**
  - Gleiche Masse, verschiedene Querschnitte ergibt verschiedene Biegefestigkeiten!
  - Um eine höhere **Biegesteifigkeit** zu gewährleisten, muss in der Mitte das Material weggelassen und außen dazu getan werden. Somit wird der *Abstand zur neutralen Faser erhöht!*
  - Bezug zum menschlichen Körper:
    - ♦ Überall dort, wo kaum Kräfte einwirken, sollte/muss Material eingespart werden:
      - Somit um die neutralen Fasern herum!
  - Seilbahnseil:
    - ♦ Besitzt einen großen Querschnitt, die jedoch aus Millionen kleiner Fasern bestehen
    - ♦ **Einzelquerschnitt** bestimmt die Biegesteifigkeit/Biegefähigkeit des Seils
    - ♦ Dieses Bauprinzip findet man auch in den kollagenen Fasern in den Sehnen wieder:
      - Für *Druck-* und *Zugfestigkeit* zuständig

### 3.6 Was kann man gegen große Zugkräfte tun?

- Es kann eine **Gegenkraft** (*Gegenlast*) angebracht werden:
  - Somit heben sich beide *Drehmomente* auf
- Im menschlichen Körper wirken die Sehnen (als Seil) der Zugspannung entgegen:
  - **Zuggurtung**: verhindern Dehnung/Zugbeanspruchung
  - Ziehende Muskeln/Sehnen:
    - ♦ Verdopplung der resultierenden Druckkraft
- Vorgang wird als *antagonistische Spannungsreduzierung* bezeichnet<sup>[3]</sup>

## Zusammenfassung:

### 4 Strategien Bei der Biegebeanspruchung (im menschlichen Körper):

- Optimierung des Querschnitts
- Strang von Einzelfasern
- Biegebelastung in Druck umwandeln
- Zuggurtungsprinzip

### 3.7 Funktionelle Anpassung:

- **Maximum-Minimum-Prinzip:**
  - Ausreichende Sicherheit unter physiologischen Bedingungen (Höchstbelastungen) bei möglichst geringem Materialverbrauch!
  - Anpassung erfolgt z.B. bei Knochen:
    - Durch Menge und Verteilung des Gewebes
    - Durch trajektorielle Anordnung (Fachwerk-Bauweise)
  - **Drucktrabekel:**
    - Arbeiten wie kleine Stützsäulen (für Druckbelastung)
    - Enthalten z.B. in Caput femoris
  - **Zugtrabekel:**
    - z.B. Trochanter major, Muskelansatzpunkte, usw.
    - Stehen quer zu den Drucktrabekeln<sup>[3]</sup>

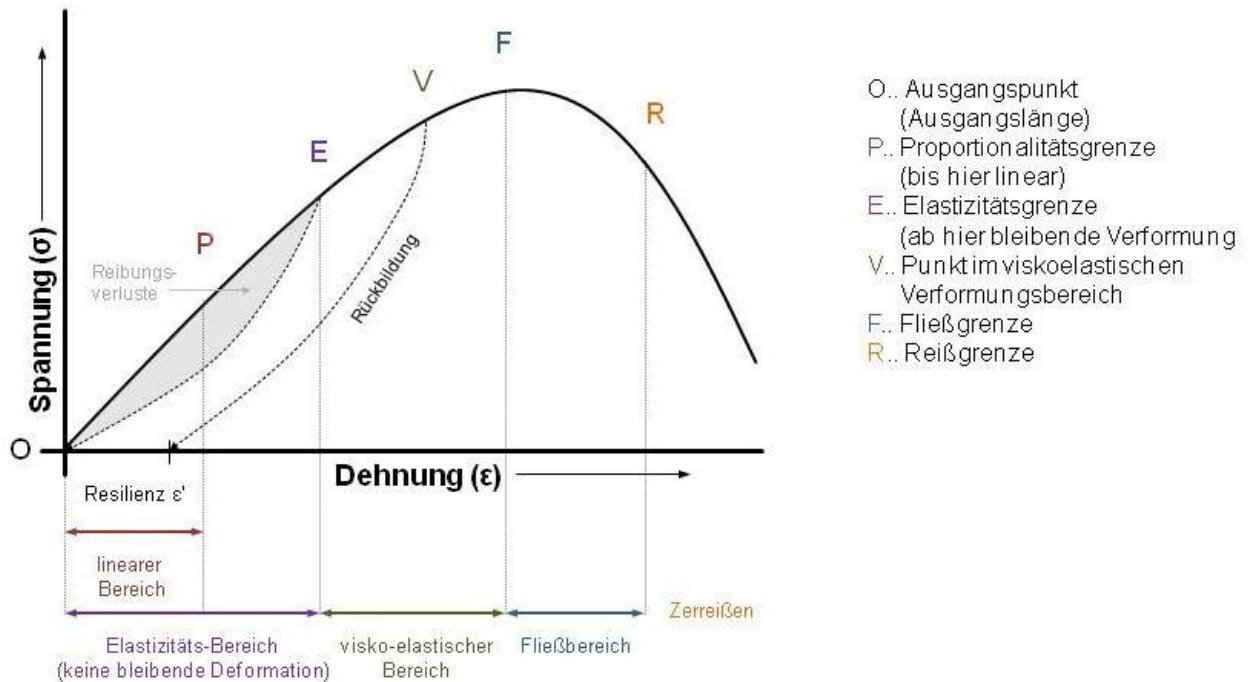
## 4. Biomaterialien:

### 4.1 Eigenschaften und Verformung:

- **Elastische** Verformung:
  - *Reversibler, umkehrbarer Prozess*
  - Z.B. Schwamm
  - Bei Krafteinwirkung erfolgt Verformung
  - Verschwindet die Krafteinwirkung, geht die Deformation zu 100% zurück
- **Plastisch** Verformung:
  - *Irreversibel, bleibt nach Abklingen der äußeren Kraft bestehen*
  - Z.B. Plastilin, Knete
  - Die Verformung bleibt nach der Krafteinwirkung bestehen
- **Viskoelastische** Verformung:
  - *Geschwindigkeit der Verformung ist wichtig (Reibungseffekte!)*
  - Reibungseffekte, deshalb geschwindigkeitsabhängig!
  - Z.B. Wunderknete
  - Bei langsamer Krafteinwirkung: plastisch
  - Bei schneller Krafteinwirkung: elastisch
  - Hintergrund viskoelastischer Flüssigkeiten (z.B. Maisstärke und Wasser):
    - ♦ Lange Kettenmoleküle sind hierfür verantwortlich
    - ♦ Bei schneller Krafteinwirkung: Federung
    - ♦ Bei langsamer Krafteinwirkung: Einsinken bis zum Boden<sup>[3]</sup>

## 4.2 Spannungs-Dehnungs-Diagramm:

- Definition:
  - Dehnung (engl. strain)  $\epsilon = \Delta L/L$  in Abhängigkeit von der durch Zugkräfte aufgeprägten mechanischen Spannung (engl. stress).



- Beschreibung – Diagramm:
  - y-Achse: **Kraft = mechanische Spannung**
  - x-Achse: **Dehnung**
  - Geht die Verformung durch Kraft über die Verformungsgrenze hinaus, dann bleibt die Verformung erhalten (keine Rückbildung mehr, irreversibel)
  - Anschließend die Bereiche Fließgrenze und Reißgrenze
  - Die im Diagramm enthaltenen Grenzen beschreiben die *Materialeigenschaften!*<sup>[3]</sup>

- **Hooke'sches Gesetz:**
  - Auslenkung/Deformation hängt linear mit der Kraft zusammen:
    - ♦ Gerade in der Grafik einzeichnen und Materialien durch Steigung charakterisieren:  
 $F = -k \cdot \Delta x$
    - ♦ Mechanische Spannung ( $\sigma$ ) dividiert durch Längenänderung ( $\epsilon$ )
    - ♦ Bei Gummi ist wenig Kraft notwendig, um einen Dehnung/Stauchung zu erzwingen
    - ♦ Bei festem Material ist mehr Kraft notwendig, um Verformung vorzunehmen!
  - Definition – Gesetz:
    - ♦ Sind Spannung und Dehnung zueinander proportional, so sind alle Kriterien für das Hooke'sche Gesetz erfüllt:  
 $\sigma = E \cdot \Delta l / l_0$ 
      - ✓ E = Proportionalitätskonstante (Elastizitätsmodul  $\sigma$ )
      - ✓  $\sigma$  und E haben die gleiche Einheit (N/m<sup>2</sup>)
      - ✓ Dehnung ist dimensionslos<sup>[3]</sup>

#### 4.3 Materialvorkommen und Funktion:

- Materialien bestimmen die unterschiedlichen biomechanischen Eigenschaften von **Binde- und Stützgewebssorten**.
  - Binde- und Stützgewebe gleichen Polymer-Kunststoffen in ihrem Fließverhalten.
- Funktion einiger Biomaterialien:
  - **Elastin:** elastische Federn
  - **Kollagen:** Element mit hoher Zugfestigkeit
  - **Proteoglykane:** visköses Dämpfungselement
- Verschiedene Binde- und Stützgewebe:
  - **Sehnen:**
    - ♦ Verbindungen zwischen Muskulatur und Knochen
    - ♦ **Kollagen Typ I** (weißlich)
    - ♦ zugfest
  - **Bänder:**
    - ♦ Verbindung zwischen *Knochen und Knochen*
    - ♦ Ausnahme: elastisches Band (Lig. flavum)
  - **Elastischer Knorpel:**
    - ♦ **Elastin** → elastische Verlängerung um 100-150% möglich (Elastizitätsmodell E ähnlich wie Gummi)
    - ♦ Vorkommen: z.B. *Kehldeckel, Ohrmuschel*
  - **Faserknorpel:**
    - ♦ **Spröder** und **druckstabiler** als elastischer Knorpel
    - ♦ Vorkommen: überall dort wo *Scherkräfte* auftreten (z.B. *Menisken, Bandscheiben, Symphyse, usw.*)<sup>[3]</sup>

- **Hyaliner Knorpel:**
  - ♦ *Bläulich schimmernd* (aufgrund der Lichtstreuung)
  - ♦ **Kollagen Typ II** (in Knorpelgelenksflächen)
  - ♦ *Gleitfähig*: geringe Reibung
  - ♦ *Druckelastisch*: hoher Wassergehalt
  - ♦ *Aggrecan*: negativ geladene Proteoglykane, stark hydrophil
  - ♦ Vorkommen: *Rippenenden, Nasenseptum, Knorpelringe* in der Trachea, *Gelenkflächen*<sup>[3]</sup>

#### 4.4 Knochen als Verbundmaterial:

- Verbundmaterial, bestehend aus:
  - **Anorganischen** Substanzen (2/3 – zwei Drittel, 43% **Hydroxyapatit** – Calciumphosphat)
    - ♦ Funktion als **Mineralspeicher**
    - ♦ 14% *Wasser*
    - ♦ Mineralien sind steife Materialien und benötigen viel Kraft für Verformung
  - **Organischen** Substanzen (36% **Kollagen**)
    - ♦ **Reduziert** die *Sprödigkeit*
    - ♦ Kollagen ist weiches Material und lässt sich rel. leicht verformen<sup>[3]</sup>

#### 4.5 Zwischenwirbelscheiben (Bandscheibe):

- Schichtaufbau:
  - **Außenring** (*Anulus fibrosus*):
    - ♦ Schichten von **Bindegewebslamellen** (aus 90% *Kollagen* und 10% *elastischen Fasern*) gehen weiter innen in Schichten aus Faserknorpel über alternierender *keilförmiger* Verlauf der **Kollagenfaserbündel**.
    - ♦ Gegen **Druck-** und **Zugbeanspruchung** (*Außenring*)
    - ♦ Gegen **Schub-** und **Torsionsbeanspruchung** (innen: *Kollagenfasern* – *Dichtung*, außen: *Kraftaufnahme* – *Kollagenfaserbündel*)
  - **Kern** (*Nucleus pulposus*):
    - ♦ **Wasserbindende Substanz**
    - ♦ „Wasserkissen“
    - ♦ Gegen **Kompression**, *Kraftübertragung* („Umleitung“) isotrop in alle Richtungen auf angrenzendes Gewebe und gewährleistet somit ein **Dämpfungselement**
- Belastungszonen:
  - Zentrisch: Druck
  - Exzentrisch: Drehen, Rotation<sup>[3]</sup>

## 5. Quellenverzeichnis:

<sup>[1]</sup> <http://de.wikipedia.org/wiki/Biomechanik>

<sup>[2]</sup> „Physik für Mediziner“ – Ulrich Harten, Springer-Verlag, 13. Auflage

<sup>[3]</sup> Vorlesung „Medizinische Physik“ an der MUI, 1. Semester