



Bioniker erforschen Pflanzen und Tiere mit den Augen eines Ingenieurs, denn eigentlich sind sie Konstruktionen der Natur mit einer Entwicklungszeit von vielen Millionen Jahren. Um diese Konstruktionen zu verstehen, müssen Bioniker den Zusammenhang zwischen Aufbau und Funktion eines Lebewesens verstehen. Dazu untersucht er den äußeren und inneren Aufbau der Lebewesen und ihre mechanischen Eigenschaften.

## Die Funktionsweise der Natur verstehen

Über Jahrtausende hinweg hat die Natur verschiedenste biologische Strukturen hervorgebracht. Selbst die einfachsten unter ihnen übertreffen technische Produkte in ihrer Komplexität, Perfektion und Multifunktionalität um ein Vielfaches. Die Biomechanik beschäftigt sich mit dem **Verständnis der mechanischen Funktionsweise natürlicher Strukturen**. Eines ihrer Ziele ist die Entwicklung verbesserter und optimierter Produkte in der Technik unter Verwendung mechanischer Prinzipien, wie sie in der Natur vorkommen.

Ein Organismus muss stets als Ganzes funktionieren. Daher sind alle seine Komponenten **in der Evolution optimiert** worden. Dazu zählen sowohl die Physiologie (= Lehre von den Lebensvorgängen), die Morphologie (= Lehre von der Form und Struktur der Organismen), die Anatomie (= Lehre von dem inneren Aufbau der Organismen) sowie andere biologische Funktionen des Organismus, und insbesondere auch seine mechanischen Eigenschaften, die seine Stabilität beeinflussen.



**Abbildung 1:** Messung der Hafteigenschaften von Efeu an einer Wand.

© Plant Biomechanics Group Freiburg 2006

Biomechanik ist eine Forschungsrichtung an der Schnittstelle zwischen Biologie und Technik. Sie umfasst die Betrachtung der Konstruktionen der Natur unter dem Gesichtspunkt der Mechanik und das Umsetzen des so erhaltenen Wissens in technische Anwendungen. Die **Mechanik**, ein Teilgebiet der Physik, untersucht die



# Biomechanik

Kräfte, denen jeder Körper in statischen (Statik = Lehre von den Kräften im Gleichgewicht) und dynamischen (Dynamik = Kräftelehre der Bewegung) Zuständen ausgesetzt ist. (vgl. Abbildung 1)

Wissenschaftler formulierten in den 20er Jahren des letzten Jahrhunderts die Erkenntnis, „dass die ‚Architektur‘ und das Wachstum aquatischer und terrestrischer Pflanzen adaptive Antworten auf **dynamische und statische Kräfte** sind“. Diese Aussage trifft nicht nur für Wasser- und Landpflanzen, sondern auch für jedes andere Lebewesen zu. Sie ist bis heute ein Grundpfeiler der Biomechanik.

## Untersuchung verschiedener mechanischer Belastungen

**Materialprüfungen** — In den Ingenieurwissenschaften sind Materialprüfungen zur mechanischen Charakterisierung der Materialien weit verbreitet. Auch biologische Materialien werden zu diesem Zweck einer Materialprüfung unterzogen. Beispielsweise werden mechanische Untersuchungen zum Zug-, Biege-, Scher- und Schwingungsverhalten durchgeführt.

**Kraft** — Kraft bezeichnet allgemein die „Fähigkeit zu wirken“. Kräfte erkennt man an ihrer Wirkung. Bei frei beweglichen Körpern führt eine Kraft zu einer Änderung des Bewegungszustandes des Körpers: Beschleunigung, Verzögerung oder Richtungsänderung. Das passiert beispielsweise wenn ein Ball geworfen, gefangen oder abgelenkt wird. Bei gebundenen Körpern bewirken Kräfte eine Deformation. Wenn man zum Beispiel einen Schwamm zusammendrückt, verformt er sich. Wenn man das selbe mit einem nassen Stück Seife versucht, kann es passieren, dass die Seife aus der Hand rutsch. Dieselbe Kraft, die einerseits den Schwamm verformt hat, kann andererseits die Seife in Bewegung versetzen (Änderung des Bewegungszustandes).

In der Mechanik ist die Kraft  $F$  (englisch: *force*) definiert als Produkt aus Masse  $m$  und Beschleunigung  $a$ . Sie wird gemessen in der Einheit Newton N. Die Gewichtskraft eines Körpers ist demnach das Produkt aus seiner Masse  $m$  und der Erdbeschleunigung  $g$  ( $g = 9,8 \text{ m/s}^2$ ). Wenn du eine Tafel Schokolade der Masse 100 g in der Hand hältst, spürst du eine Kraft von einem Newton ( $0,1 \text{ kg} * 9,8 \text{ m/s}^2 = 0,98 \text{ N}$  (mit  $\text{N} = \text{kg} * \text{m/s}^2$ )).

**Spannung** — Spannung beschreibt die wirkende Kraft pro Fläche. Wenn die Tafel Schokolade auf deiner flachen Hand liegt, ist das nicht unangenehm. Legst du jedoch eine Reißzwecke mit der Spitze nach unten auf deine Hand und legst dann die Tafel Schokolade obendrauf, wird es unangenehm. Die Kraft ist in beiden Fällen dieselbe, aber da sie sich nun auf eine kleinere Fläche konzentriert, wird die Spannung größer. Es ist also wichtig, zwischen Kraft und Spannung zu unterscheiden (siehe Mini-



Experiment „Spannung und Luftballon“). Stellen, an denen die Spannung besonders hoch ist, werden Spannungsspitzen genannt.

## Mini-Experiment: Spannung und Luftballon

Anhand von Luftballons kannst du leicht ausprobieren, welchen Einfluss die Größe der Fläche hat, mit der du eine Kraft auf einen Luftballon überträgst. Zunächst drückst du mit der flachen Hand (große Fläche) auf einen Luftballon. Du brauchst so sehr viel Kraft, damit die Spannung so hoch wird, dass der Luftballon platzt - wenn er überhaupt platzt. Wenn du hingegen mit einer Nadel auf einen Luftballon drückst, platzt er viel leichter. Das liegt daran, dass die Nadel an ihrer Spitze eine ganz kleine Fläche hat. Dadurch wird auch bei kleinen Kräften die Spannung groß.



**Belastung** — Als Belastung bezeichnet man alle äußeren Kräfte, die auf einen Körper einwirken. Sie können in Form von Zug, Druck, Scherung, Biegung und Torsion oder in Kombination auftreten. Diese Belastungsarten werden unten näher erklärt.

**Steifigkeit und Festigkeit** — Wenn ein Gegenstand mechanisch belastet wird, kann er zweierlei Reaktionen auf diese Belastung zeigen: Er kann sich verformen oder er kann versagen. Diese Reaktionen hängen ab von der Steifigkeit und der Festigkeit des Gegenstandes, zwei Eigenschaften, die auf keinen Fall verwechselt werden sollten.

Ein Material, das eine hohe Festigkeit hat, lässt sich nicht leicht brechen. Dies sagt jedoch noch nichts darüber aus, ob es sich auch leicht verformen lässt. Eine dicke Eisenstange zum Beispiel ist fest und zugleich steif, da sie weder leicht bricht noch sich leicht verformen lässt. Auch ein Gummibärchen ist fest, da sich nicht leicht brechen lässt, aber es ist nicht steif, denn es lässt sich leicht verformen.



# Biomechanik

Wie leicht ein Material sich verformen lässt, wird durch seine Steifigkeit bestimmt. Die Steifigkeit ist unabhängig von der Festigkeit. Es gibt Gegenstände, die sowohl steif als auch fest sind (Eisenstange), es gibt aber auch Gegenstände die steif sind ohne fest zu sein, wie eine Glasscheibe oder ein Keks. Sie lassen sich zwar nicht leicht verformen, können aber leicht brechen. Andere Gegenstände sind weder steif noch fest. Ein Himbeergelee zum Beispiel kann sich verformen, wenn man es zusammendrückt, und kann zugleich leicht durchtrennt werden. (vgl. Tabelle 1)

Tabelle 1: Beispiele für verschiedene Kombinationen aus Festigkeit und Steifigkeit

	steif	nicht steif
fest	Eisenstange	Gummibärchen
nicht fest	Keks	Gelee

**Stab und Balken** — Im Folgenden wird von Stäben und Balken die Rede sein. Dabei handelt es sich immer um einen Körper, der deutlich länger als breit ist. Wenn unser langer Körper (zum Beispiel ein Stock) durch Zug, Druck oder Torsion belastet wird, nennen ihn die Physiker einen Stab. Wenn er aber gebogen wird, so wird er als Balken bezeichnet.

**Zug und Druck** — Bei Zug wirkt eine Kraft auf einen Körper. Dabei ist die Kraft auf der Fläche des Körpers gleichmäßig verteilt. Die Kraft wirkt im rechten Winkel und in positiver Richtung (vom Körper weg) auf die Oberfläche des Körpers. Beim Seilziehen etwa zieht man die beiden Seilenden nach außen. Physikalisch gesprochen, wirkt auf die Endflächen der Seile eine rechtwinklige Kraft, sie zeigt vom Ende des Seiles weg und ist damit parallel zum gesamten Seil.

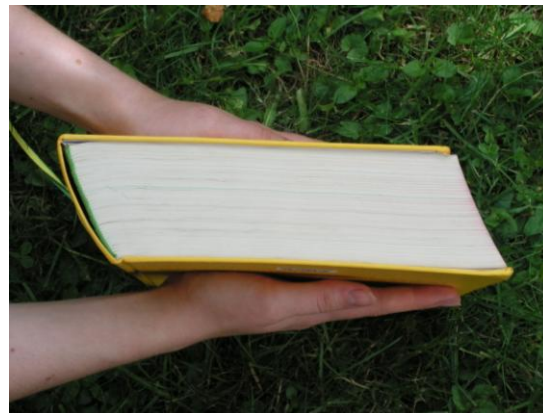
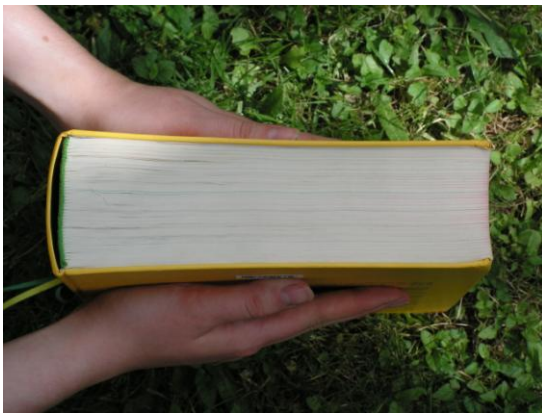
Wie du im Abschnitt „Stabzugmodell“ feststellen wirst, unterscheiden sich Zug und Druck lediglich durch das Vorzeichen, das die Richtung bestimmt, in der die Kraft wirkt.

**Scherung** — Bei Scherung werden die gegenüberliegenden Flächen eines Körpers gegeneinander verschoben. Dies kannst du mit einem dicken Buch leicht mal ausprobieren (siehe Mini-Experiment „Scherung und Buch“). Dabei ändert sich der Abstand der Flächen (hier: die Buchdeckel) nicht, so dass das Volumen des Körpers gleich bleibt. Scherung spielt bei vielen Verformungsvorgängen (Deformationsvorgängen) eine Rolle. Manchmal ist diese aber so gering, dass sie vernachlässigt werden kann.



## Mini-Experiment: Scherung und Buch

An einem dicken Buch kannst du Folgendes ausprobieren: Nimm das Buch so zwischen deine Hände, dass der Buchrücken zu dir zeigt. Nun bewegst du die eine Hand leicht von dir weg, die andere leicht zu dir hin. Die Buchdeckel haben sich gegeneinander verschoben. Das Buch sieht jetzt von oben betrachtet wie ein Parallelogramm aus (wie auf dem rechten Foto). Du hast mit deinen Händen Scherkräfte auf die Buchdeckel wirken lassen. Das Buch hat sich verformt, sein Volumen ist aber immer noch gleich (sonst würden nicht mehr alle Seiten hineinpassen).



**Biegung** — Eine Biegung entsteht, wenn ein punktwise gestützter Körper außerhalb seiner Stützstellen belastet wird. Ein Sprungbrett im Schwimmbad ist an einem Ende befestigt. Wenn jemand vorne auf dem anderen Ende des Brettes steht, erfährt das Brett eine Biegung.

**Biegesteifigkeit** — Der Widerstand, den eine Struktur der Biegung entgegensetzt, ist die Biegesteifigkeit. Wenn du einen Stab wie beispielsweise einen Ast, ein Lineal oder einen ähnlichen langen und dünnen Gegenstand an beiden Enden festhältst und dann biegest, ist er sogar an zwei Punkten - den beiden Enden - gestützt und wird zugleich an beiden Enden belastet.

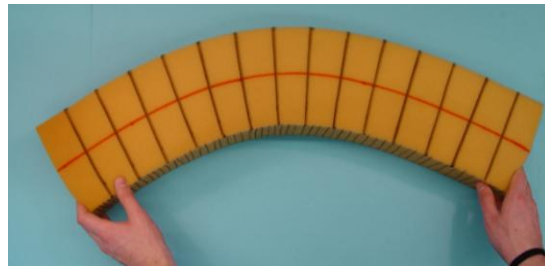
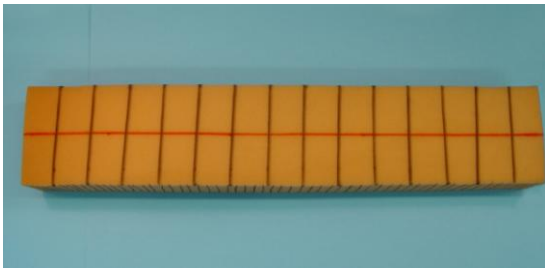
**Hebel** — Wenn ein Körper nicht fest, sondern beweglich fixiert ist, wird er sich bewegen ohne sich zu biegen. Ein Beispiel hierfür sind Wippen, wie man sie auf fast jedem Spielplatz findet. Sie haben in der Mitte ein Gelenk, so dass sie kippen bzw. wippen können. Es handelt sich um Hebel mit zwei gleichlangen Hebelarmen. Den Abstand von der Einspannstelle bis zu der Stelle an der die externe Kraft angreift, wird sowohl bei Hebeln als auch bei fest eingespannten Balken als Kraftarm bezeichnet.



## Mini-Experiment: Biegung und Schaumstoffbalken

Mit einem Schaumstoffbalken kannst du leicht ausprobieren, was beim Biegen eines Balkens passiert. Dazu zeichnest du zunächst eine rote Linie in der Mitte des Balkens parallel zur langen Seite deines Balkens. Anschließend zeichnest du orthogonal dazu zahlreiche schwarze Linien, die jeweils denselben Abstand voneinander haben (zum Beispiel 5 cm).

Nachdem du den Balken entsprechend vorbereitet hast, kannst du verfolgen, was mit den verschiedenen Teilen des Balkens passiert. Du wirst sehen, auf einer Seite nähern sich die schwarzen Linien an, auf der anderen entfernen sie sich voneinander. Die rote Linie behält ihre Länge bei.



**Biegung ist eine Kombination aus Zug und Druck** — Bei der Biegung einer Struktur, treten verschiedene Spannungen auf, die ihr schon kennen gelernt habt: Zug und Druck. Wie ihr im Mini-Experiment „Biegung und Schaumstoffbalken“ sehen könnt, erfährt die untere Seite des Balkens Druckspannung. Dort nähern sich im Modell die schwarzen Linien durch Stauchung einander an. Die andere Seite steht unter Zugspannung, dort haben sich die schwarzen Linien voneinander entfernt.

Im Zentrum des Balkens gibt es eine Ebene, in der sich Zug und Druck gegenseitig aufheben. Diese ist auf dem Schaumstoffbalken mit der roten Linie markiert. In dieser Ebene haben sich die Abstände der schwarzen Linien nicht geändert. Der Fachausdruck für eine solche Ebene, in der sich die Spannungen aufheben, lautet neutrale Ebene oder Schwerpunktebene.

**Flächenträgheitsmoment** — Bei der Biegung wirken sich nicht nur die Querschnittsfläche des Balkens und die Richtung der einwirkenden Kraft auf die Spannungen und somit auch auf die Verformungen aus, sondern auch die Querschnittsform und die Orientierung des Querschnitts. Ein Maß, das die geometrischen Eigenschaften der Querschnitte eines Balkens beschreibt, ist also notwendig. Über dieses Maß, Flächenträgheitsmoment genannt, erfährst du im



# Biomechanik

Abschnitt „Flächenträgheitsmoment“ mehr. Das Flächenträgheitsmoment beeinflusst maßgeblich die Biegesteifigkeit einer Struktur.

**Widerstandsmoment und Biegemoment** – Das Widerstandsmoment  $W_B$  ist ein Maß dafür, wie weit die „widerstandsresistenten“ Flächenelemente nach außen verlagert sind. Je größer das Widerstandsmoment, desto geringer die Biegespannung. Auch das Biegemoment ist von der Geometrie der Struktur, die gebogen wird, abhängig. Es berücksichtigt die Länge des Balkens. Zu diesen beiden Begriffen findest du ebenfalls mehr in Informationen im Abschnitt „Biegemoment“.

**Biegung im Experiment** – Es gibt verschiedene Versuchsanordnungen, mit denen die Biegesteifigkeit einer Struktur bestimmt werden kann: Zweipunktbiegung, Dreipunktbiegung oder Vierpunktbiegung. Diese Bezeichnungen richten sich nach der Anzahl der Auflagepunkte ( $A$ ) und der Anzahl der Punkte, an denen eine Kraft ( $F$ ) angreift. Gemessen wird die Biegekraft in Abhängigkeit von der zur Probenauslenkung (vgl. Tabelle 2). Auch Alltagsgegenstände werden gebogen. Für jede Art der Biegung findest du jeweils ein Beispiel aus der Welt des Sports.

Tabelle 2: Vergleichende Darstellung der verschiedenen Biegeversuche

	Zweipunktbiegung	Dreipunktbiegung	Vierpunktbiegung
<b>Fixierung</b>	einseitig	zwei Auflagen	zwei Auflagen
<b>Krafteinleitung</b>	am freien Ende	zentrisch zwischen den Auflagen	rechts und links im Abstand $a$ von den Auflagen
<b>Biegesteifigkeit</b>	$EI = \frac{l^3}{3b}$ [N·m <sup>2</sup> ]	$EI = \frac{l^3}{48b}$ [N·m <sup>2</sup> ]	$EI = \frac{l^2 a}{16b}$ [N·m <sup>2</sup> ]
	$b$ = Steigung der Regressionsgeraden aus dem Weg-Kraft-Diagramm der Biegung [mm·N <sup>-1</sup> ]  $l$ = Abstand zwischen Probenfixierung und Kraftapplikation [mm]	$b$ = Steigung der Regressionsgeraden aus dem Weg-Kraft-Diagramm der Biegung [mm·N <sup>-1</sup> ]  $l$ = Abstand zwischen den Auflagen [mm]	$b$ = Steigung der Regressionsgeraden aus dem Weg-Kraft-Diagramm der Biegung [mm·N <sup>-1</sup> ]  $l$ = Abstand zwischen den Auflagen [mm]  $a$ = Abstand zwischen Auflage und Ort der Krafteinleitung [mm]
<b>Vorteile</b>	Kommt häufig in Natur und Technik vor. Ist auch für steife Proben geeignet.	Es treten geringere Scherkräfte als bei der Zweipunktbiegung auf.	Die Durchbiegung wird nicht am Ort der Krafteinleitung gemessen. Da kaum Scherkräfte auftreten, wird die Biegung gemessen.

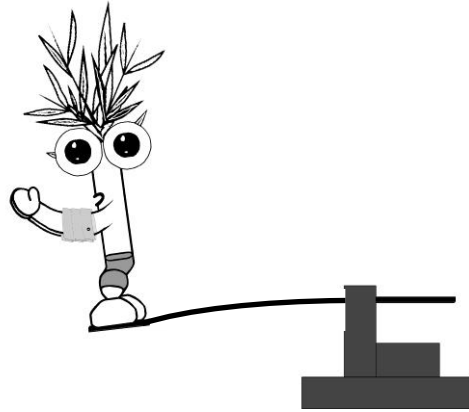


## Art der Biegung

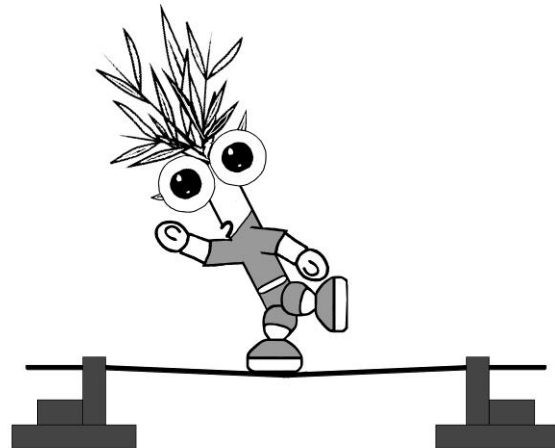
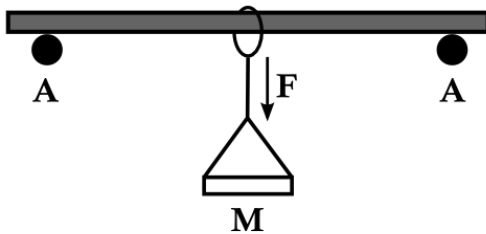
## Welt des Sports

Info

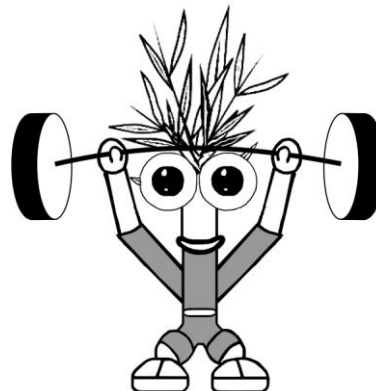
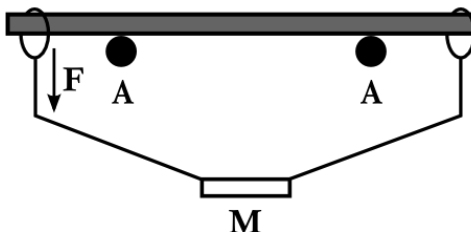
### Zweipunktbiegung



### Dreipunktbiegung:



### Vierpunktbiegung:







**Torsion** — Eine weitere Möglichkeit einen Gegenstand zu belasten ist einen Körper in sich zu verdrillen (siehe auch Miniexperiment „Torsion und Geschirrtuch“). Dies wird durch entgegengesetzte Kräftepaare ausgelöst. In der Fachsprache sagt man: Scherkräfte wirken so, dass ein Drehmoment um die Längsachse des Körpers verursacht wird.

## Mini-Experiment: Torsion und Geschirrtuch

Wenn du ein kariertes Geschirrtuch für diesen Versuch nimmst, kannst du die Torsion am besten beobachten, du kannst aber auch ein anderes Tuch nehmen. Zunächst legst du das Geschirrtuch ausgebreitet auf den Tisch und rollst es in einer Richtung auf. Auf diese Weise erhält dein Geschirrtuch die Form eines Stabes. Nun nimmst du das eine Ende des Tuches in deine rechte Hand, das andere Ende in deine linke Hand. Drehe dann eine Hand im Uhrzeigersinn und eine Hand gegen den Uhrzeigersinn. Achte darauf, das Tuch dabei stets zu spannen. Die Torsion kannst du am Muster ablesen.

