

# Inhaltsverzeichnis

<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>1. Physiologische Aspekte im Mittelschulunterricht</b>	<b>2</b>
1.1 Allgemeine Überlegungen zum fächerübergreifenden Unterricht	2
1.2 Eingliederung in den Lehrplan	3
1.3 Auswertung physikalischer Schulbücher	4
1.4 Neue Zielsetzungen	4
<b>2. Physikalische Grundlagen der Herzphysiologie</b>	<b>6</b>
2.1 Herzanatomie	6
2.2 Ventilwirkung der Herzklappen	6
2.3 Aktionsphasen	9
2.4 Herzmechanik	11
2.5 Mechanismen der Anpassung an verschiedene	14
2.5.1 Regulation bei kurzzeitiger Volumens- bzw. Druckbelastung	14
2.5.2 Regulation am innervierten Herzen	16
2.6 Energetik der Herzaktion	17
2.6.1 Herzarbeit	17
2.6.2 Sauerstoffverbrauch und Wirkungsgrad	18
<b>3. Physikalische Grundlagen des Gefäßsystems</b>	<b>20</b>
3.1 Aufbau und Aufgaben des Kreislaufsystems	20
3.1.1 Prinzipieller Aufbau eines Gefäßes	22
3.2 Hämodynamische Gesetzmäßigkeiten	22
3.2.1 Viskosität des Blutes	23
3.2.2 Laminare und turbulente Rohrströmung	23
3.2.3 Hämodynamische Widerstandsberechnungen	26

3.2.3.1	Totaler peripherer Widerstand (TPR)	28
3.2.4	Mittlere Blutgeschwindigkeit in der Aorta	28
3.2.5	Mittlere Blutgeschwindigkeit in den Kapillaren.	29
3.3	Druckwellen	30
3.3.1	Windkesselfunktion der Aorta	30
3.3.2	Ausbreitung der Pulswelle	30
3.4	Regelkreis	33
<b>4.</b>	<b>Anwendung im Unterricht</b>	<b>36</b>
4.1.	Didaktische Überlegungen	36
4.2	Arbeitsvorlagen:	39
<b>5.</b>	<b>Elektrische Phänomene der Muskelzelle</b>	<b>63</b>
5.1	Spannungsverlauf an Skelettmuskelzellen	63
5.2	Spannungsverlauf an Herzmuskelzellen	65
5.2.1	Schwellenreiz, Refraktärzeit	67
5.2.2	Alles - oder - nichts - Gesetz	67
5.2.3	Nernstsche Gleichung	69
5.2.4	Ionale Mechanismen	70
5.3	Reizleitungssystem des Herzens	71
5.4	Das Herz als Dipol	73
5.5	Das Elektrokardiogramm	76
5.5.1	Form des EKG und Terminologie	76
5.5.2	Entstehung des EKG	77
5.5.3	Ableitungsformen	81
5.5.3.1	Ableitung nach Einthoven	84
5.5.3.2	Ableitung nach Wilson	84
5.5.3.3	Ableitung nach Goldberger	85
5.5.4	Diagnostische Aussagen	85

<b>6. Anwendung im Unterricht</b>	<b>86</b>
6.1 Grobplanung	86
6.2 Arbeitsvorlagen zu Ruhepotential und EKG	86
<b>Zusammenfassung</b>	<b>105</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>106</b>
<b>Abbildungsquellennachweis</b>	<b>108</b>

# Einleitung

Die Erforschung und Beschreibung der Vorgänge und Erscheinungen in der Natur erfordert eine Naturwissenschaft, die sich aufgrund der Vielfalt und Komplexität notwendigerweise in verschiedene Disziplinen und Fächer aufteilt. Das gemeinsame Arbeitsfeld Natur erfordert aber auch ein Zusammenspiel im Sinne einer fächerübergreifenden Synthese. Gerade in unserer Zeit, in der die zwingende Notwendigkeit des verantwortungsvollen Umgangs mit der Natur nicht nur im Bewußtsein einiger Wissenschaftler verankert sein sollte, erscheint eine Zusammenarbeit mehrerer Disziplinen sinnvoll.

Nicht nur in wissenschaftlichen Bereichen hat sich die Spezialisierung auf Kosten des Verständnisses der komplexen Zusammenhänge durchgesetzt, auch in der derzeitigen schulischen Ausbildung an Haupt- und Mittelschulen haben fächerübergreifende Aspekte bestenfalls in Projektwochen Platz.

So scheint es nicht weiter verwunderlich, wenn dem Schüler der Zusammenhang zwischen seinem (physikalischen) Fachwissen und seinen täglichen Alltagserfahrungen verborgen bleibt. Zu weit scheinen seine Erlebnisbereiche von den Problemstellungen der Physik entfernt zu sein, solange physikalische Probleme nicht auch *seine* Probleme sind. Das dafür notwendige emotionelle Engagement des Schülers ist eine wichtige Zielsetzung guten Unterrichts.

Sinnvoll erscheint in diesem Zusammenhang bei der Themenauswahl im Unterricht an die Erlebniswelt des Schülers anzuknüpfen, *seine* Erlebnisse zum Ausgangspunkt physikalischer Betrachtungsweisen zu machen. Unter diesem Gesichtspunkt ist wohl nichts so *naheliegend* wie der eigene Körper.

# 1. Physiologische Aspekte im Mittel- schulunterricht

## 1.1 Allgemeine Überlegungen zum fächerübergreifenden Unterricht

Es ist kein Geheimnis, daß Physik als einer der unbeliebtesten Gegenstände im Fächerkanon gilt. Das Unbehagen der Schüler gegenüber dem Fach Physik ist wohl in der Konzeption des traditionellen Physikunterrichts begründet.

Dieser besteht oft in einer Anhäufung von fachsystematisch aufgebautem Faktenwissen, wobei sich Unter- und Oberstufe nur durch das Anspruchsniveau unterscheiden, ohne auf die Erfahrungswelt des Schülers einzugehen.

Ein möglicher Weg aus diesem Dilemma wäre die verstärkte Darstellung der Beziehungen der Physik zu anderen Gegenstandsbereichen, also eine Bereicherung des Unterrichts mit Aspekten aus Geschichte, Chemie, Biologie, Leibeserziehung, Musik und Philosophie.

Dabei ist nicht an eine zusätzliche Belastung und damit verbundene stoffliche Überladung des Unterrichts gedacht, sondern an ein *Hand in Hand- Arbeiten* der verschiedenen Fächer. Das Gelingen eines solchen *Projekts* ist entscheidend von der Kommunikation der einzelnen Lehrer abhängig.

Physik sollte sich dabei als ein Fach darstellen, das oft Baustein, manchmal aber auch Basis anderer Felder ist. Unter diesen Gesichtspunkten ist die Physik eine offene, lebendige und damit lebensnahe Wissenschaft, ohne dabei ihre fachspezifische Denk- und Arbeitsweise aufgeben zu müssen.

## 1.2 Eingliederung in den Lehrplan

Wird der Aspekt *Physiologie des Menschen* in den physikalischen Unterricht einbezogen, bietet sich die Zusammenarbeit mit dem Fach Biologie naturgemäß an. Bei der Besprechung einiger Teilbereiche wird aber das Zusammenwirken mit anderen Fächern nicht nur sinnvoll, sondern auch notwendig erscheinen, will man gewisse Vorgänge in ihrer tatsächlichen Komplexität verstehen lernen.

Gedacht ist dabei an das Fach *Musik* bei der Besprechung der physikalischen Grundlagen der menschlichen Stimme [1], bei der Funktionsweise des Ohrs [2 und 3] und bei der Darstellung des Herzzykluses im Phonokardiogramm [4].

*Leibeserziehung* bietet sich unter dem Gesichtspunkt Sport und Physik an [5]. Begriffe wie Arbeit beim Heben von Gewichten, Energieumsatz und die Belastbarkeit des Stützapparates bei verschiedensten Bewegungen [siehe z.B. 6 und 7] und die Auswirkungen sportlicher Aktivität auf das menschliche Herz-Kreislaufsystem könnten am "lebenden Objekt" studiert werden und, wo das sinnvoll und machbar ist, auch gemessen werden.

*Chemie* ist sicherlich unumgänglich beim Verstehen der verschiedensten Sinneseindrücke (Geruch, Geschmack und Sehen), aber auch bei den Vorgängen der Reiz-Leitungssysteme im menschlichen Körper.

Wie schon erwähnt, sind die Querverbindungen mit der *Biologie* augenscheinlicher. Je nach Schultyp verschieden bieten sich hier Überschneidungen in den Lehrplänen an. So z.B. die Funktionsweise des Auges in der geometrischen Optik [8], das menschliche Gehörorgan, Sprechen und Singen in der Akustik bzw. Schwingungs- und Wellenlehre, der Blutdruck bei Eigenschaften von Flüssigkeiten, der Blutkreislauf in der Strömungslehre, Wärmeempfinden und Wärmeaustausch der menschlichen Haut in der Wärmelehre [6], elektrische Phänomene der Muskelzelle in der Elektrizitätslehre [6].

Erweiterbar wäre diese Themenreihe sicherlich durch den aktuellen Bezug der Umwelteinflüsse wie Strahlen- und Radioaktivitätsbelastung im menschlichen Körper.

Erwähnt sei letztlich das umfangreiche Themengebiet Physik und Medizin [9], wofür Physik das Basiswissen für das Verstehen von wichtigen Untersuchungsmethoden liefern könnte.

### **1.3 Auswertung physikalischer Schulbücher**

Wie nicht anders zu erwarten, befinden sich in den derzeit verwendeten Physiklehrbüchern der Mittelschulen fast keine Verweise auf Querverbindungen zur Biologie. Ausnahmen bilden hier die unblutige Blutdruckmessung nach Riva-Rocci, die in ihrer prinzipiellen Funktionsweise kurz beschrieben ist, und das Themenheft "Natur und Physik" von Mathelitsch, das als Erweiterungsprogramm für die 6-8.Klasse gedacht ist. Darin werden Themenbereiche wie Aufbau und Funktion des Auges, Farbsehen, Sprechen und Singen, Bildung von Vokalen und Hören von Tönen erarbeitet. Die Behandlung dieser Aspekte ist zwar gestützt auf den Lehrplan schon in der Unterstufe möglich, wird sich aber dort meist auf eine qualitative Bereicherung beschränken müssen. Die quantitative anspruchsvollere Behandlung wird wohl dem Oberstufenunterricht vorbehalten bleiben, aber auch hier mit der Einschränkung, Messungen und Formeln nur dort zu verwenden, wo sie sinnvoll und für das Verständnis unbedingt notwendig sind.

### **1.4 Neue Zielsetzungen**

Bei allen anderen in Punkt 2.2. erwähnten Themenbereichen ist der Lehrer im Prinzip zum Selbststudium gezwungen. Dieses beinhaltet neben der zeitaufwendigen Literatursuche in didaktischen Fachzeitschriften und physiologischen Lehrbüchern aber auch eine dem Schulunterricht angepaßte Aufbereitung des Stoffes und Erstellung didaktischer Materialien.

Genau hier möchte die vorliegende Arbeit einhaken, indem sie die physikalisch relevanten Grundlagen der einzelnen Vorgänge im menschlichen Körper zusammenfaßt und um elementare physiologische Fakten ergänzt. Darüber hinaus soll auch Unterrichtsmaterial vorgestellt werden.

Es erscheint einleuchtend, daß die Behandlung des "physikalischen Menschen" den Rahmen dieser Arbeit bei weitem sprengen würde, sodaß eine Eingrenzung auf die physikalischen Grundlagen des Herz-Kreislaufsystems notwendig wurde.

Dafür sprachen mehrere Gründe:

- Herz-Kreislaufkrankungen zählen zu den häufigsten Krankheiten unserer Zeit, rund ein Drittel der westlichen Bevölkerung leidet darunter. Daher ist zu erwarten, daß dem Schüler unmittelbar aus seinen Alltagserfahrungen derartige Fälle persönlich bekannt sind.
- Bei fast 50% der Todesfälle liegt die Ursache bei einer Herz - Kreislaufkrankung.
- Schüler kennen zwar oft Untersuchungsmethoden wie Blutdruckmessung und EKG, wissen aber nicht, auf welchen physikalischen Grundlagen diese Untersuchungsmethoden beruhen.
- In der 4.Klasse ist im Rahmen des Biologieunterrichts eine Untersuchung beim Schularzt vorgesehen, bei der unter anderem auch der Blutdruck bestimmt wird. Neben diesen "praktischen" Gründen bleibt zu hoffen, daß durch diesen Blick ins Herzen, ins Innerste des Menschen, auch ein bißchen Bewunderung für die Wunder der Schöpfung und die Einzigartigkeit jedes einzelnen von uns zurückbleibt.



## **2. Physikalische Grundlagen der Herzphysiologie**

### **2.1 Herzanatomie**

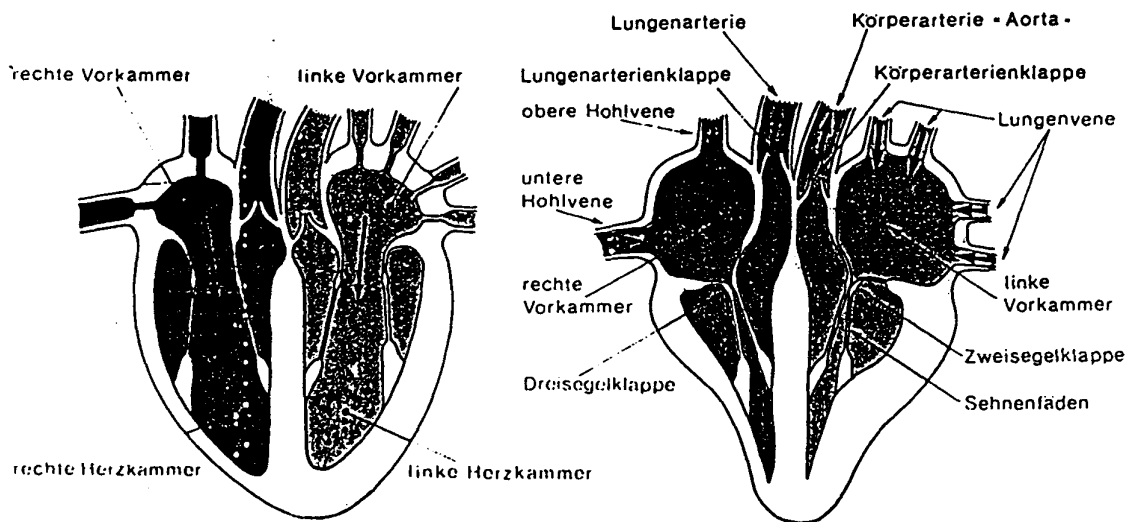
Das Blut kann seine zahlreichen Aufgaben im Organismus nur erfüllen, wenn es ständig durch den Körper zirkuliert. Die Umwälzpumpe der Blutbewegung durch die Gefäße ist das Herz.

Es besteht aus zwei muskulären Hohlorganen (Abb. 2,1). Die rechte Hälfte, bestehend aus Vorhof und Kammer, nimmt das sauerstoffarme Blut aus dem gesamten Körper auf und führt es der Lunge zu. Nachdem es hier mit Sauerstoff angereichert wurde, gelangt es zurück in die linke Herzhälfte, von wo aus die Verteilung auf die verschiedenen Organe erfolgt.

Die rechte Herzhälfte fördert also immer nur venöses (sauerstoffarmes), die linke Herzhälfte nur arterielles (sauerstoffreiches) Blut. Die Bezeichnung von Blutgefäßen als Arterien bzw. Venen richtet sich nach der Strömungsrichtung - nicht nach der Beschaffenheit des enthaltenen Blutes. Venen führen das Blut dem Herzen zu; Arterien führen es vom Herzen weg.

### **2.2 Ventilwirkung der Herzklappen**

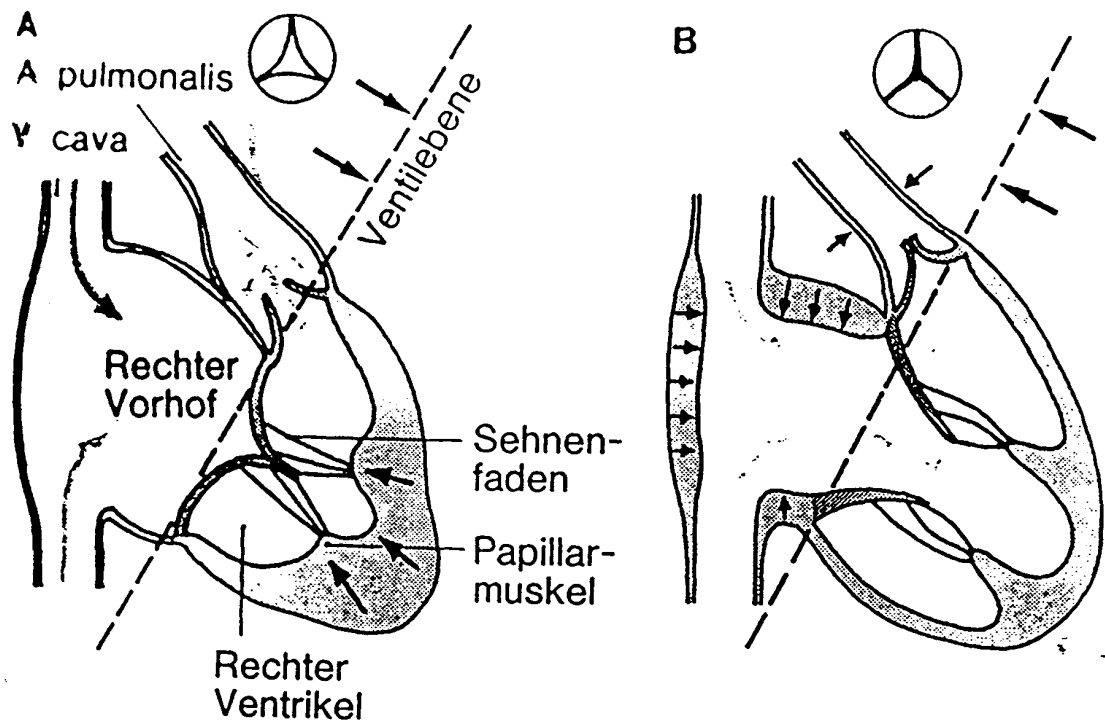
Herzklappen befinden sich an den Ein- und Auslaßöffnungen beider Kammern. Die Segelklappen (AV-Klappen) zwischen Vorhöfen und Kammern dienen der Abdichtung der Kammern gegen die Vorhöfe während der Kontraktion der Herzkammer (Systole); die Taschenklappen an der Wurzel der großen Arterien verhindern den Rückstrom während der Erweiterung des Herzens (Diastole) (s. Abb. 2,2).



**Abb. 2,1:**Die Arbeitsweise des Herzens

Links: Bei der Kontraktion (Zusammenziehung) der Vorkammern strömt das Blut in die erschlafften Herzkammern.

Rechts: Die anschließend kontrahierenden Herzkammern pressen das Blut aus dem Herzen in die Arterien. Venöses Blut gelangt über die Lungenarterie in die Lunge, das arterielle dagegen fließt über die Aorta in den Körper.



**Abb. 2,2:** Längsschnitt durch die rechte Herzhälfte

Links: Die kontrahierende Herzkammer preßt das Blut aus dem Herzen. Die geschlossenen Segelklappen verhindern ein Rückströmen in den Vorhof.

Rechts: Das Blut strömt vom Vorhof in die erschlaffte Herzkammer. Die Segelklappen sind geöffnet, die Arterienklappe geschlossen.

## 2.3 Aktionsphasen

Das Öffnen und Schließen der Herzklappen wird im wesentlichen vom Verhalten des Drucks in den angrenzenden Herzhöhlen bzw. Gefäßen bestimmt. Dementsprechend lassen sich sowohl in der Systole (Kontraktion des Herzmuskels) als auch in der Diastole (Erschlaffung des Herzmuskels) Aktionsphasen gegeneinander abgrenzen, in denen entweder vorwiegend Druckänderungen bei konstantem Volumen oder Volumensverschiebungen bei geringen Änderungen des Drucks erfolgen.

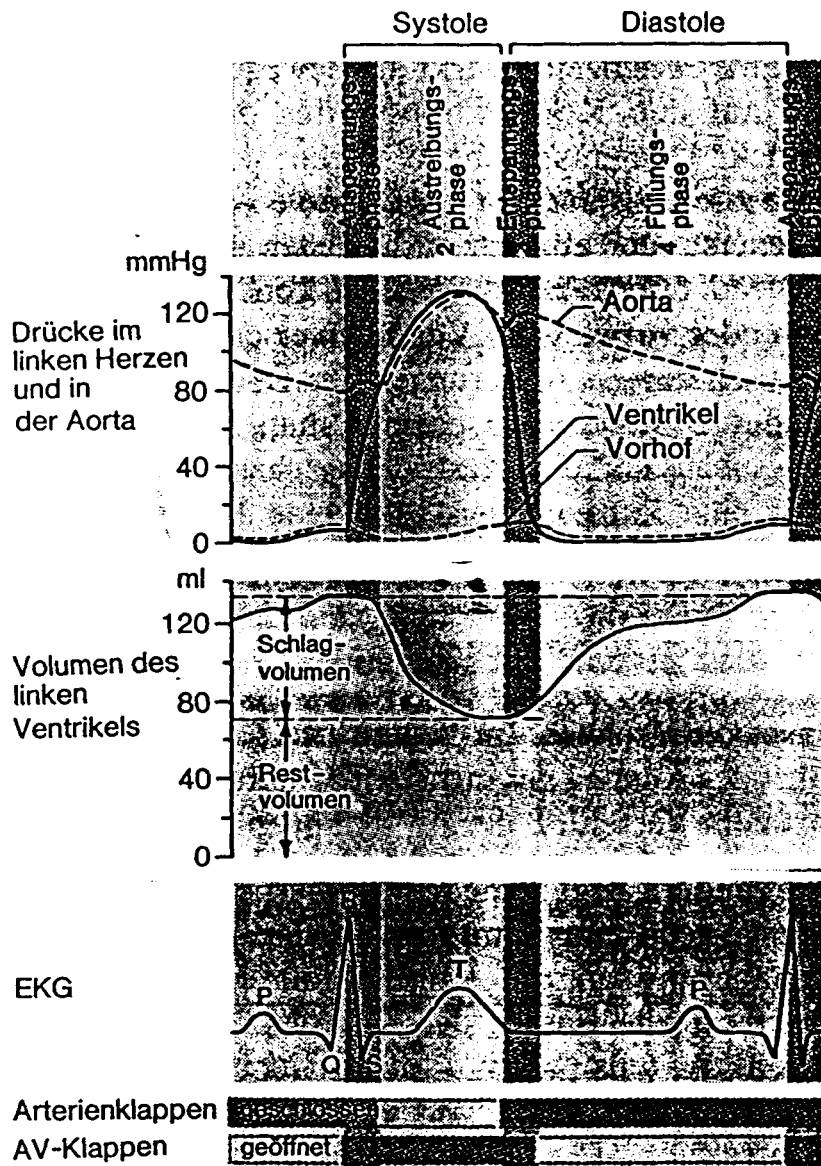
*Anspannungsphase:* der Druckanstieg innerhalb der Kammern führt zum Verschluß der AV-Klappen. Da die Arterienklappen noch verschlossen sind, spannt sich die Muskulatur um den inkompressiblen Kammerinhalt und führt zu einem steilen Druckanstieg (s. Abb. 2,3). Die Dauer dieser Phase beträgt bei normaler Schlagfrequenz und in Ruhe etwa 60ms.

*Austreibungsphase:* sobald der Kammerdruck den diastolischen Aortendruck von ca. 80 mm Hg übertrifft, öffnen sich die Taschenklappen und die Austreibung beginnt. Dabei wird unter Ruhebedingungen nur etwa die Hälfte des Kammerinhalts als Schlagvolumen (SV 130 ml) in die Aorta ausgeworfen; ca. 70 ml verbleiben als Restvolumen in der Herzkammer zurück.

Der Verschluß der Aortenklappe erfolgt später als man aufgrund der Druckverhältnisse erwarten könnte (s. Abb. 2,3). Die zeitliche Diskrepanz erklärt sich aus der Trägheit des systolisch beschleunigten Blutvolumens, das aufgrund der ihm erteilten kinetischen Energie noch kurze Zeit - sogar entgegen dem herrschenden Druckgefälle - weiterfließt.

*Entspannungsphase:* verläuft als Erschlaffung bei konstantem Volumen, wobei der Kammerdruck rasch auf nahezu Null abfällt. Beim Unterschreiten des Vorhofdrucks öffnen sich die AV-Klappen.

*Füllungsphase:* in dieser Phase steigt der Kammerdruck nur wenig an. Die Volumensvergrößerung geschieht anfangs schnell, dann langsam. Die Vorhofsystole hat nur eine etwa 8% Effekt auf die Füllmenge der Kammern.



**Abb. 2,3:** Zeitliche Zuordnung der Vorgänge im Herzen

Die grauen Querbalken im unteren Teil des Diagramms markieren die Dauer des Verschlusses der betreffenden Klappen.

## 2.4 Herzmechanik

Eine Reihe physikalischer Gesetzmäßigkeiten ergibt sich aus dem anatomischen Aufbau des Herzens, weshalb hier kurz darauf eingegangen wird.

Die Spiralschicht, eine der fünf Schichten die die Herzwand aufbauen, bewirkt die Kontraktion des Herzmuskels durch Faserverkürzung und Verdrillung. Sie sind in den beiden Kammern entgegengesetzt orientiert, sodaß das Herz nicht in Rotation versetzt wird.

Im folgenden wird exemplarisch die linke Herzkammer betrachtet, die vereinfacht Kugelgestalt haben soll. (Diese Annahme ist nicht ganz exakt, führt aber im Prinzip zu richtigen Ergebnissen.)

Bei der Kontraktion des Herzmuskels wird das in der Kammer befindliche Blut auf einen bestimmten Druck  $p$  gebracht. Dieser hat eine Kraft  $F = p \cdot A$  zufolge, die die umliegende Wand zu dehnen sucht.  $A$  ist eine gedachte kreisförmige Trennfläche und hat die Größe  $A = r^2 \pi$

Somit ergibt sich:  $F = p \cdot r^2 \pi$

Je kleiner der Radius, desto geringer ist die Faserkraft die notwendig ist, um einen bestimmten Druck in der Kammer zu erzeugen oder aufrechtzuerhalten. Daher ist bei konstanter Kraft der Muskelfaser für die Erzeugung eines hohen Druckes im Herzen ein *kleines* Herzvolumen günstig.

Die von einer *Blutpumpe* insgesamt geleistete Arbeit ist das Produkt aus Druck mal Volumen. Welche Bedingungen müssen also erfüllt sein, um ein möglichst großes Volumen ökonomisch auszustoßen?

Stellt man sich eine Muskelfaser rings um das kugelförmig gedachte Herz vor, dann ist deren Länge  $l = 2 \cdot \pi \cdot r$ . Eine geringe Längenänderung bedeutet einen geringeren Sauerstoffverbrauch der Muskelfaser, folglich wird eine möglichst geringe Radiusveränderung angestrebt. Je *größer* der Radius des Kammervolumens  $V = 4/3 \cdot \pi \cdot r^3$  ist, umso größer wird bei *gleicher* Faserverkürzung das ausgeworfene Volumen.

Die Natur ist, wie so oft in der Evolution, bei diesen zwei sich widersprechenden Bedingungen beim Bau des Herzens einen Kompromiß eingegangen, um eine möglichst große Effektivität zu erreichen. Es sei erwähnt, daß sich die Effektivität des

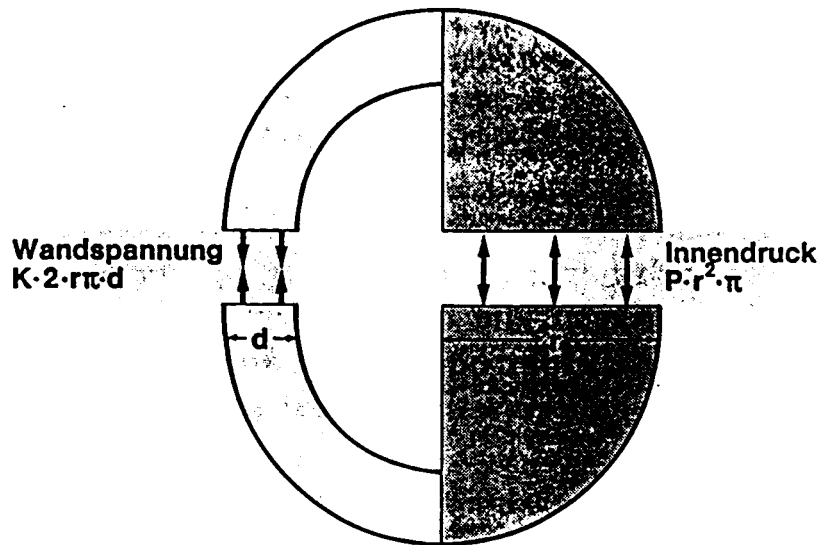
Herzens, gemessen am Sauerstoffverbrauch, mit steigendem Schlagvolumen und weniger mit steigendem Druck erhöhen läßt.

Eine weitere wichtige Beziehung besteht auch zwischen Wandspannung  $\sigma$  und dem Innendruck  $p$  eines Hohlkörpers mit dem Radius  $r$  und der Wanddicke  $d$ , die lautet [10]:

$$\sigma = p \cdot r / 2d \quad \text{bzw.} \quad p = \sigma \cdot 2d / r$$

Diese Gleichung veranschaulicht, daß ein Anstieg des Kammerdrucks in der Anspannungsphase nicht durch eine zusätzliche Kraftentwicklung der Muskulatur bedingt ist, sondern sich aus den physikalischen Gesetzmäßigkeiten bei den Größenänderungen des Herzens ergibt (Abb. 2.4).

Nimmt in der Austreibungsphase der Radius ab und die Wanddicke zu, so ergibt sich offensichtlich ein Druckanstieg auch bei konstanter Kraft.



**Abb. 2,4:** Beziehung zwischen Innendruck und Wandspannung bei einer kugelförmig gedachten Kammer. Beide Wirkungen sind getrennt dargestellt.

## 2.5 Mechanismen der Anpassung an verschiedene Belastungen

Ein gesundes Herz ist in der Lage sein Herzminutenvolumen (Blutmenge der linken Kammer in einer Minute) um bis auf das 5fache des Ruhevolumens zu steigern. Da beide Herzkammern in Serie geschaltet sind, müssen ihre Minutenvolumina stets weitgehend übereinstimmen. Würde z.B. die rechte Kammer nur 2% mehr Blut fördern als die linke, so käme es innerhalb von wenigen Minuten zu einer bedrohlichen Blutansammlung in der Lunge [10]. Zwei Mechanismen bewältigen diese erstaunliche Anpassungsfähigkeit des Herzens:

- Regulationen, die auf den natürlichen Eigenschaften der Herzmuskulatur beruht und daher auch am isolierten Herzen zu beobachten sind
- Regulationen, die auf Hormonausschüttungen beruhen.

Im folgenden sollen diese Mechanismen unter physikalischen Aspekten näher betrachtet werden.

### 2.5.1 Regulation bei kurzzeitiger Volumens- bzw. Druckbelastung

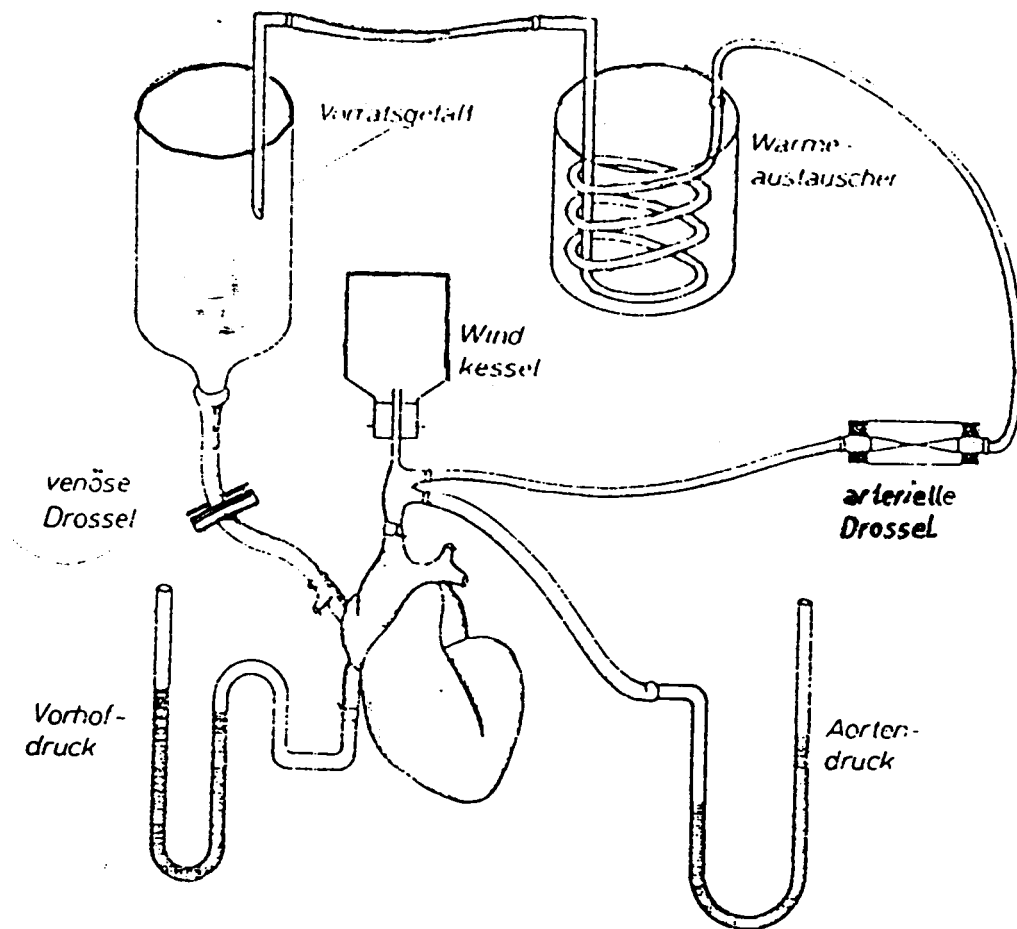
Dieser Anpassungsmechanismus wird nach seinen Entdeckern Frank-Starling-Mechanismus benannt. Das dabei verwendete Modell besteht aus dem Herzen und der Lunge (Abb. 2.5).

Der Lungenkreislauf ist dabei nicht abgebildet, da er lediglich die Sauerstoffbereitstellung garantiert, für die hier interessierenden Messungen aber keine Rolle spielt.

Sämtliche Nervenverbindungen sind abgetrennt, sodaß das Herz mit konstanter Frequenz schlägt. Der große Kreislauf ist durch ein blutgefülltes Meßsystem mit einstellbaren Widerständen ersetzt. Die Bluttemperatur wird konstant gehalten. Man kann bei diesem Modell zwei Größen unabhängig voneinander regulieren:

- akute Druckbelastung simulieren, indem man den Strömungswiderstand durch die Veränderung der arteriellen Drossel erhöht.





**Abb. 2,5:** Messungen am isolierten Herzen

Mittels arterieller Drossel wird eine Veränderung im arteriellen System simuliert. Mittels venöser Drossel wird der Zufluß zum Herzen verändert.

- akute Volumensbelastung simulieren, indem man den venösen Zufluß durch die venöse Drossel steuert; der venöse Zufluß steuert das enddiastolische Füllungsvolumen und damit die Faservordehnung.

Auf welche Weise kann ein solchermaßen reduziertes Herzen überhaupt noch auf Belastungen reagieren? Durch Veränderung der beiden Parameter kamen Frank und Starling zu folgenden Ergebnissen:

1. Erhöht sich der Widerstand im arteriellen System, dann nimmt während der darauffolgenden Systole der Aortendruck zu. Dies führt zu einem verfrühten Klappenschluß, woraus eine Verringerung des Schlagvolumens resultiert (daraus folgt eine Vergrößerung des Restvolumens). Ändert sich der venöse Zufluß nicht, muß sich das gesamte enddiastolische Volumen dadurch vergrößern. Diese Vergrößerung bedeutet jedoch eine stärkere Faservordehnung und führt bei der nächsten Herzaktion zu einer Vergrößerung der Kontraktionskraft (s. Pkt. 3.4). Das Herz paßt sich also dem erhöhten Widerstand an, indem es das ursprüngliche Volumen unter höherem Druck auswirft.
2. Erhöht sich der venöse Zustrom, erhöht sich damit auch das enddiastolische Volumen und es tritt eine Vergrößerung des Schlagvolumens ein.

Von der Möglichkeit einer Regulation der Herztätigkeit durch das enddiastolische Füllungsvolumen im Sinne des Frank-Starling-Mechanismus wird immer dann Gebrauch gemacht, wenn *Füllungsänderungen* eintreten, *ohne* eine generelle *Aktivitätssteigerung*. Dies gilt für die Abstimmung der Förderleistung der beiden Kammern, aber auch bei Änderung der Körperhaltung (Liegen, Stehen), Vergrößerung des Blutvolumens (Transfusion), Erhöhung des Abflußwiderstandes und bei der Ausschaltung der neuralen Steuerung durch Pharmazeutika.

### 2.5.2 Regulation am innervierten Herzen

Die Anpassung an körperliche Arbeit kann nicht durch den Frank-Starling-Mechanismus erklärt werden. Danach wäre nämlich zu erwarten, daß ein leistungsfähiges Herz in Ruhe klein ist und sich bei Belastung in Anpassung an den vermehrten venösen Rückfluß vergrößert. Genau das Gegenteil ist der Fall!

Diese Anpassung zusammen mit einer Steigerung der Herzfrequenz basiert auf dem Einfluß des Sympathicus und stellt den wichtigsten Mechanismus bei Belastung dar. Auf die genauere Beschreibung muß aber im Rahmen dieser Arbeit verzichtet werden mit dem Verweis auf einschlägige Fachliteratur [15].

## 2.6 Energetik der Herzaktion

### 2.6.1 Herzarbeit

Die allgemeine Definition von Arbeit = Kraft · zurückgelegter Weg [Nm = Joule] läßt sich natürlich auch verwenden für die Arbeit eines Skelettmuskels, der sich verkürzt, um ein Gewicht zu heben. Bei der Verkürzung des Herzmuskels wird aber kein Gewicht gehoben, sondern ein bestimmtes Blutvolumen  $V$  unter der Entwicklung von Druck  $p$  gegen einen Strömungswiderstand verschoben.

Die hierbei geleistete Druck-Volumen-Arbeit muß noch um die Beschleunigungsarbeit vermehrt werden. Diese kinetische Energie berechnet sich aus  $mv^2/2$ . Diese insgesamt vom Herzen geleistete Arbeit wird anschließend in andere Energieformen umgewandelt.

Bei der *Berechnung der Herzarbeit* müßte man über die zeitabhängigen Parameter integrieren. Eine Vereinfachung auf Mittelwerte liefert aber schon eine recht brauchbare Näherung. Bezogen auf die einzelne Systole ergeben sich folgende Werte [10]:

*Druck-Volumen-Arbeit:  $p \cdot V$*

linker Ventrikel

$$P = 100 \text{ mm Hg} = 100 \cdot 133 \text{ N/m}^2$$

$$V = 70 \text{ ml} = 70 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \quad p \cdot V = 0,931 \text{ Nm}$$

rechter Ventrikel

$$P = 15 \text{ mm Hg} = 15 \cdot 133 \text{ N/m}^2$$

$$V = 70 \text{ ml} = 70 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \quad p \cdot V = 0,140 \text{ Nm}$$

*Beschleunigungsarbeit:  $mv^2/2$*

linker bzw. rechter Ventrikel

$$m = 70\text{g} = 70 \cdot 10^{-3} \text{ kg}$$

$$v = 0,5\text{m/s} \text{ (Berechnung s. Kap. 3.2.4)} \quad 1/2 mv^2 = 0,009 \text{ Nm}$$

Die Gesamtarbeit  $W$  liegt daher in der Größenordnung von rund 1Nm bezogen auf eine Herzaktion.

Wie aus obiger Rechnung ersichtlich, beträgt der Anteil der Beschleunigungsarbeit nur etwa 1%. Die vom Herzen zu leistende Arbeit wird also überwiegend vom Schlagvolumen und vom Aortendruck bestimmt. Unter Vernachlässigung des kinetischen Anteils geht die Druck-Volumen-Arbeit zunächst in potentielle Energie der Aorta über, um während der Diastole in kinetische Energie des Blutes umgewandelt zu werden.

Hat das Blut den gesamten Kreislauf durchströmt, ist seine Energie durch Reibungsverluste praktisch Null geworden, letztlich also in Wärmeenergie umgewandelt worden.

Wird bei der Berechnung der *Herzleistung* die Dauer einer Kontraktion mit rund einer Sekunde veranschlagt, liegt die Herzleistung = Arbeit pro Zeit in der Größenordnung von  $1 \text{ W} = 1\text{Nm/s}$ .

## 2.6.2 Sauerstoffverbrauch und Wirkungsgrad

Das Herz bezieht seine Energie aus dem oxidativen Abbau von Nährstoffen. Ohne auf die medizinischen Methoden der Bestimmung des Sauerstoffverbrauch näher einzugehen, seien hier nur einige Zahlenwerte erwähnt [10].

Ein Herz eines Erwachsenen von 300 g Masse verbraucht 24-30 ml Sauerstoff/min.; das sind rund 10% des Ruhesauerstoffverbrauchs bei einem Gewichtsanteil des Herzens vom Gesamtgewicht von nur 0,5%!

Bei gleicher Arbeitsleistung ist der Sauerstoffverbrauch übrigens erheblich höher, wenn das Herz gegen einen hohen Druck auswirft, als wenn es ein großes Volumen gegen einen niedrigen Druck auswirft.

Der *Wirkungsgrad* des Herzens ist definiert als das Verhältnis der pro Minute geleisteten mechanischen Arbeit zur insgesamt aufgewendeten Energie. Er beträgt beim voll suffizienten Herzen zwischen 10 - 20% d.h. 1/10 bis 1/5 der verbrauchten Energie wird tatsächlich in mechanische Energie umgewandelt.

Bei einem mittlerem Wirkungsgrad von 15% müssen innerhalb von 24 Stunden rund 850 kJ umgesetzt werden; der Grundumsatz innerhalb von 24 Stunden beträgt beim Erwachsenen 5800 - 7500 kJ [10].

Die oben erwähnten Zahlen machen verständlich, daß bei einer Unterbrechung der Durchblutung schon nach wenigen Minuten ein Funktionsverlust eintritt. Bei einer Unterbrechung der Sauerstoffzufuhr steht das Herz ebenfalls nach 6-10 min. still, wobei bei einer Dauer der Unterbrechung von ca. 30 min. strukturelle Veränderungen auftreten, die eine *Wiederbelebung* unmöglich machen. Betrifft die Sauerstoffunterbrechung den ganzen Organismus (z.B. Ersticken) ist die Möglichkeit der Wiederbelebung durch das Gehirn limitiert und beträgt zwischen 8 und 10 min. [10].

# 3. Physikalische Grundlagen des Gefäßsystems

## 3.1 Aufbau und Aufgaben des Kreislaufsystems

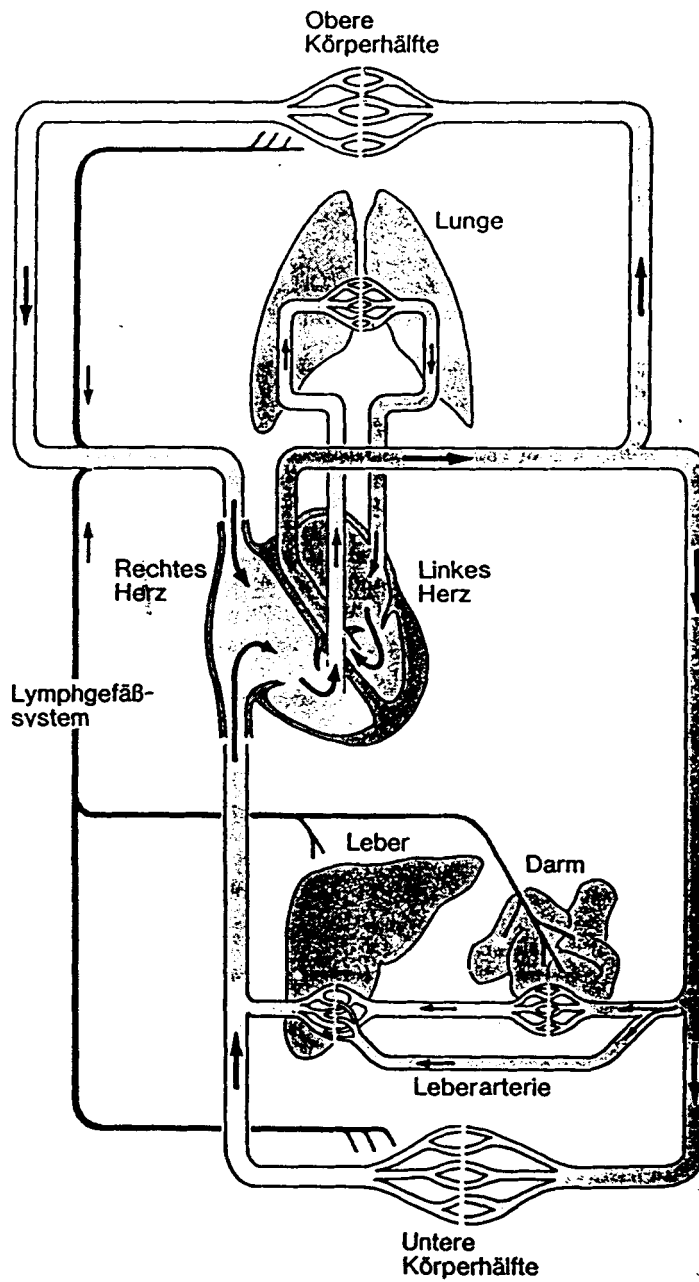
Der Blutkreislauf stellt ein in sich geschlossenes System von Leitungsröhren dar, die in sinnvoller Parallel- oder Serienschaltung den gesamten Organismus durchziehen. Die wichtigste Aufgabe des Systems ist es, die Zellen mit den für sie erforderlichen Stoffen zu versorgen als auch der Abtransport von Stoffwechselprodukten.

Weiters findet ein Transport zum Zwecke der Regulation des Wasser- und Salzhaushaltes statt, die Beförderung von Hormonen als chemische Signalüberträger und von Immunkörpern als Abwehrstoffe. Der Blutkreislauf dient auch dem Wärmetransport zum Zwecke der Thermoregulation.

Abb. 3.1 zeigt eine schematische Darstellung des menschlichen Blutkreislaufes, der aus zwei in Serie geschalteten Kreisläufen besteht. Die rechte Kammer treibt das Blut im kleinen *Lungenkreislauf* durch die Lungenarterie in die Lungengefäße, von wo aus es zurück ins Herz fließt. Die linke Kammer wirft durch die große Körper Schlagader (Aorta) in den großen *Körperkreislauf* aus und führt das Blut zu den einzelnen Organbereichen.

In diesen verzweigt sich das Gefäßsystem bis zu den zahlreichen Kapillaren. Aus den Kapillaren strömt das Blut in kleine Venen, deren Enden in größere einmünden. Von dort aus wird das Blut durch die beiden Hohlvenen wieder dem Vorhof des rechten Herzens zugeführt. Damit ist der Kreislauf geschlossen.

Es besteht ein wichtiger funktioneller Unterschied zwischen den zwei Kreisläufen. Der Körperkreislauf als Versorger der lebenswichtigen Organe ist ständigen Anpassungen an verschiedenste Bedingungen unterworfen und verfügt daher über eine Reihe von Regulations- und Steuermechanismen. Der Lungenkreislauf dient lediglich dem Gasaustausch und der Wärmeabgabe und ist funktionell viel weniger kontrolliert und reguliert. Zudem sei noch das Lymphgefäßsystem erwähnt, daß Flüssigkeit außerhalb der Zelle aufnimmt und dem Blutgefäßsystem zuführt.



**Abb. 3,1:** Schematische Darstellung des Herz- Kreislaufsystems

Körper- und Lungenkreislauf bilden einen in sich geschlossenen Kreislauf. Das Lymphgefäßsystem stellt ein zusätzliches Transportsystem im Organismus dar.

### 3.1.1 Prinzipieller Aufbau eines Gefäßes

Eine Arterie besteht im Prinzip aus 3 Schichten, die aus elastischen oder kollagenen Fasern aufgebaut werden. Sehr wichtig ist dabei, daß diese Fasern ein rein passives Verhalten zeigen, also nur dann expandieren, wenn eine Kraft auf sie ausgeübt wird. Die diese Schichten umschließenden Muskelfasern hingegen verfügen über kontraktile Elemente, die sie über hormonelle oder nervale Reize befähigen, aktiv zu kontrahieren. Sie können also völlig unabhängig vom Blutdruck den Gefäßquerschnitt verändern.

Die Venen unterscheiden sich in ihrem prinzipiellen Aufbau nur durch die Schichtdicken bzw. deren Verhältnissen zueinander.

## 3.2 Hämodynamische Gesetzmäßigkeiten

In grober Annäherung läßt sich das Ohmsche Gesetz der Hämodynamik analog dem Ohmschen Gesetz für Gleichstromkreise formulieren.

Es lautet entsprechend:

$$\Delta p = R \cdot V'$$

$\Delta p$  = mittlere Druckdifferenz zwischen Rohranfang und -ende; diese entspricht der elektrischen Spannung  $U$  = Potentialdifferenz

$V'$  = Volumen pro Zeit, das sich aus der über den Querschnitt gemittelten linearen Strömungsgeschwindigkeit ( $v'$ ) und der Fläche des Querschnitts ergibt ( $V' = v' \cdot r^2 \cdot \pi$ );  $V'$  entspricht der Stromstärke  $I$ , also Ladung pro Zeit

$R$  = Hämodynamischer Widerstand; entspricht dem elektrischen Widerstand

Nach dem *Kontinuitätsprinzip* ergibt sich, daß das Stromzeitvolumen  $V'$  in einem System bestehend aus verschieden weiten Röhren konstant ist. Wenn durch die Wand der Röhren keine Flüssigkeit ein- oder austritt, die Stromstärke also gleich bleibt, verhält sich die Geschwindigkeit umgekehrt proportional dem Querschnitt der hintereinander gelegenen Teilabschnitte; in engen Röhren ist die Strömung daher schneller.



### 3.2.1 Viskosität des Blutes

Jeder Transport einer realen Flüssigkeit in einem Gefäßsystem ist mit Reibung verbunden, die sich durch den Widerstand äußert, den die laminar strömende Flüssigkeit der Antriebskraft entgegensetzt. Die Flüssigkeit haftet dabei in einer dünnen Schicht an der Oberfläche des umschließenden Materials, die weiter innen liegenden Schichten gleiten hinweg. Nach Newton ist die an der Fläche  $A$  angreifende Kraft  $F$  durch die Gleichung

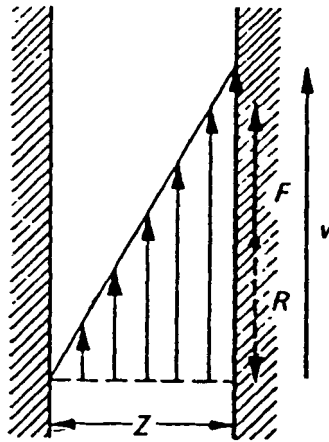
$$F = A \cdot \eta \cdot dv/dz$$

gegeben [11]. Abb.3,2 zeigt das Geschwindigkeitsprofil. Es bildet sich unter der einfachen Bedingung der ebenen Strömung ein lineares Geschwindigkeitsgefälle aus.  $\eta$ , die *Viskosität*, beschreibt die Eigenschaften der Flüssigkeit und stellt normalerweise eine temperaturabhängige Materialkonstante dar (bei Blut allerdings veränderlich). Die Einheit der Zähigkeit  $\eta$  ergibt sich aus obiger Gleichung zu  $[\text{kg}/\text{ms}] = [\text{Pa}\cdot\text{s}]$

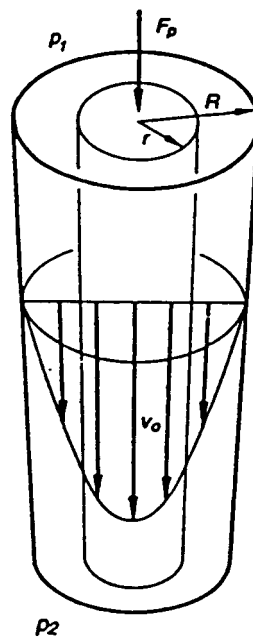
### 3.2.2 Laminare und turbulente Rohrströmung

In fast allen Gefäßabschnitten liegt normalerweise *laminare* oder Schichtenströmung vor. Dabei gleiten selbst sehr dünne Schichten glatt übereinander hinweg, d.h. alle Teilchen bewegen sich parallel zur Gefäßachse, wobei die unmittelbar der Gefäßwand anliegende Schicht aufgrund der Adhäsion ruht, während sich die darauffolgenden Schichten immer mehr verschieben, sodaß ein parabolisches Geschwindigkeitsprofil entsteht (Abb. 3.3).

Dieses Profil spielt für den Bluttransport eine wesentliche Rolle. Da die Geschwindigkeit in der Mitte der Röhre am größten ist, ist aufgrund der Bernoullischen Gleichung [11] in der Mitte der geringste Druck. Daher wirkt auf die mittransportierten Blutkörperchen eine Druckkraft zum Zentrum und hält sie auf diese Weise von der Wand fern.



**Abb. 3,2:** Lineares Geschwindigkeitsprofil bei laminarer Strömung



**Abb. 3,3:** Ein Flüssigkeitszylinder in einem Rohr wird von der Druckkraft angetrieben, von der Reibungskraft zurückgehalten. Das Gleichgewicht beider bildet ein parabolisches  $v$ -Profil.

Durch mathematische Überlegungen [11, 12] läßt sich die Strömung durch eine Röhre mit dem Radius  $r$  und der Länge  $l$  bei einer gegebenen Druckdifferenz  $\Delta p$  berechnen. Pro Zeit strömt durch die Röhre nach *Hagen-Poiseuille* das Volumen:

$$V' = \pi \cdot \Delta p \cdot r^4 / 8 \cdot \eta \cdot l$$

Unter Berücksichtigung des Ohmschen Gesetzes folgt hiermit für den Strömungswiderstand:

$$R = 8 \cdot l \cdot \eta / \pi \cdot r^4$$

Der Widerstand  $R$  wächst umgekehrt proportional zur vierten Potenz des Gefäßradius  $r$  und ist proportional der Länge des Rohres und der Viskosität des Blutes. Damit erklärt sich auch, daß die Änderung des Gefäßradius die wirkungsvollste Regulation der Durchblutung und des Druckes darstellt.

Das Hagen-Poiseuille-Gesetz gilt allerdings nur unter folgenden Voraussetzungen: für 1. starre Röhren, 2. laminare Strömung, 3. homogene Flüssigkeit und 4. benetzbare Wandungen. Dem Ohmschen Gesetz liegt wiederum eine konstante Strömung (Gleichstrom) zugrunde.

Das Gefäßsystem besteht allerdings aus *elastischen* Röhren, in denen die *inhomogene* Flüssigkeit Blut unter bestimmten Voraussetzungen auch *turbulent* sein kann und bedingt durch die rhythmische Tätigkeit des Herzens in weiten Teilen des Gefäßsystems *wechselnde* Strömungen aufweist. Dadurch wird der Wert der oben erwähnten Gesetze für die Hämodynamik zwar eingeschränkt, eine grobe Beurteilung der elementaren Kreislauffunktionen aber durchaus möglich.

Unter bestimmten Bedingungen kann die laminare Strömung in eine *turbulente Strömung* übergehen, bei der Wirbel auftreten und sich die Teilchen auch quer zur Gefäßachse bewegen. Die Stromstärke hängt dabei nicht mehr linear vom Druckgefälle ab, sondern annähernd proportional der Quadratwurzel vom Druckgefälle. Eine Verdoppelung der Stromstärke setzt daher ca. 4-fach höhere Drücke voraus, was eine erhebliche Mehrbelastung des Herzens darstellt.

Den Übergang von laminarer zu turbulenter Strömung markiert die Reynoldszahl (13), die anschaulich das Verhältnis von Trägheits(Turbulenz)kraft zu Reibungskraft darstellt:

$$Re = \rho \cdot v \cdot r / \eta$$

### 3.2.3 Hämodynamische Widerstandsberechnungen

Mit Hilfe der Kirchhoffschen Gesetze lassen sich eine Reihe von Gesetzmäßigkeiten der Kreislaufwiderstände verstehen. Im Punkt 3.2.2 ergab sich die Abhängigkeit  $R \cong 1/r^4$ . Bei einer Halbierung des Gefäßradiuses steigt also der Widerstand auf das 16-fache an (Abb. 3.4).

Welcher Widerstand ist aber zu erwarten, wenn sich ein Gefäß mit dem Radius  $r$  in jeweils zwei mit halben Radius  $r/2$  aufteilt (Abb. 3.5)? Nimmt man an, daß die Längen jeweils gleich sind, könnte man voreilig vermuten, da die Summe beider kleineren Radien wieder  $r$  ergibt, daß der Gesamtwiderstand unverändert bleibt. Das ist aber falsch!

Für parallel geschaltete Widerstände gilt nach dem Kirchhoffschen Gesetz:

$$1/R_{\text{ges}} = 1/R_1 + 1/R_2 + \dots + 1/R_n$$

Setzt man willkürlich den Widerstand  $R$  des Gefäßes mit Radius  $r$  gleich 1, dann beträgt der Widerstand des Gefäßes  $r/2$  das 16-fache von  $R$ .

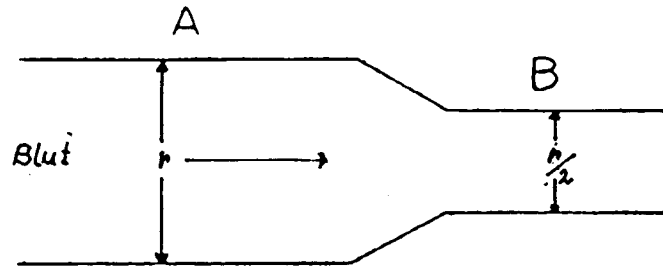
Speziell für  $R_1$  und  $R_2$  gilt dann:

$$1/R_{\text{ges}} = 1/16 + 1/16 \text{ bzw. } R_{\text{ges}} = 1/2 \cdot 16 = 8$$

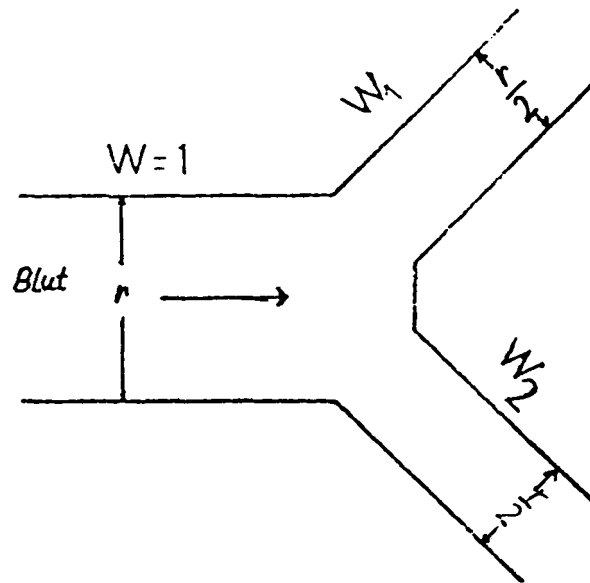
Der Gesamtwiderstand zweier parallel geschalteten Gefäße mit halben Radius ist also acht mal so groß wie der eines Gefäßes mit dem Radius  $r$ .

Analog ergibt sich für  $n$  Rohre die Abhängigkeit des Gesamtwiderstands  $R$ :

$$R \cong 1/n \cdot 1/r^4$$



**Abb. 3,4:** Widerstandsänderung eines Gefäßes bei Halbierung des Radius



**Abb. 3,5:** Widerstandsänderung bei Verzweigung eines Gefäßes in zwei Gefäße mit jeweils dem halben ursprünglichen Durchmesser

### 3.2.3.1 Totaler peripherer Widerstand (TPR)

Der Gesamtwiderstand im Körperkreislauf wird als totaler peripherer Widerstand bezeichnet. Die sehr unterschiedlichen Widerstände der einzelnen Organkreisläufe sind die Ursache der unterschiedlichen Verteilung des Herzzeitvolumens.

Auf die Halsschlagader, die großen Arterien und Arterienäste entfallen rund 19% des Widerstands, während auf die kleinen Arterien und Arteriolen knapp 50% entfallen.

Diese enorme Widerstandszunahme beruht auf der Verkleinerung des Durchmessers, die von der zunehmenden Zahl der parallel liegenden Arteriolen nicht kompensiert werden kann [10]. Die Änderungen des Strömungswiderstandes in den einzelnen Organen sind zusammen mit der Änderung des Herzminutenvolumens (HMV) die wichtigsten Faktoren für eine Anpassung der Stromstärke an wechselnde Anforderungen der einzelnen Organe.

### 3.2.4 Mittlere Blutgeschwindigkeit in der Aorta

Das Volumen pro Zeit in der Aorta berechnet sich wie folgt:

$$V' = A \cdot v$$

$v$  ist die, bei einer pulsierenden Flüssigkeit notwendige, zeitliche und räumliche Mittelung.

Mit den folgenden Werten für die Aorta gilt:

$$V' = 5000 \text{ cm}^3/\text{min.}$$

$$r = 1 \text{ cm}$$

$$A = \pi \cdot r^2$$

Daraus folgt für  $v$  in cm/sec.:

$$v = 5000 \text{ cm}/3.60\text{s} = 28 \text{ cm/s}$$

Bei einem HMV von 5l und einem Aortenradius von rund 1 cm fließt das Blut mit einer mittleren Geschwindigkeit von rund 30 cm/s.

### 3.2.5 Mittlere Blutgeschwindigkeit in den Kapillaren.

Um ein Gefühl für die unterschiedlichen Größenordnungen zu bekommen, folgt die Berechnung der Geschwindigkeit in den Kapillaren wobei  $V'$  natürlich auch  $5000 \text{ cm}^3/\text{min}$ . beträgt (Kontinuitätsprinzip). Das Blut fließt durch alle parallel geschalteten Kapillaren. Die Gesamtfläche ergibt sich dabei zu  $1800 \text{ cm}^2$ . Durch Einsetzen erhält man für  $v$ :

$$v = 5000 \text{ cm}^3 / 1800 \text{ cm}^2 \cdot 60 \text{ s} = 0,046 \text{ cm/s}$$

Diese sehr geringe Geschwindigkeit verbunden mit einer relativ langen Kontaktzeit ist auch notwendig um den Stoffaustausch zu ermöglichen. Auch hier basiert also die biologische Funktion auf physikalischen Gesetzmäßigkeiten. Die nachfolgende Tabelle (Abb. 3.6) gibt einen Überblick über die Verhältnisse im arteriellen System.

Bei einem Durchmesser der Kapillaren von rund  $7 \text{ }\mu\text{m}$  wandern die Erythrozyten quasi im *Gänsemarsch* hintereinander, wobei sie sich deformieren. Dadurch liegt natürlich keine laminare Strömung mehr vor. Es bilden sich Wirbeln zwischen den Erythrozyten aus, wodurch der Stoffaustausch ebenfalls begünstigt wird.

	Aorta	Arteriole	Kapillare
Anzahl	1	$2 \cdot 10^7$	$10^{10}$
Durchmesser	$4 \text{ cm}$	$20 \text{ }\mu\text{m}$	$8 \text{ }\mu\text{m}$
Gesamte Querschnittsfläche	$3,14 \text{ cm}^2$	$63 \text{ cm}^2$	$5000 \text{ cm}^2$
Volumenstrom	$8 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$	$4 \cdot 10^{-12} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$	$8 \cdot 10^{-15} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$
Länge	$40 \text{ cm}$	$2 \text{ mm}$	$1 \text{ mm}$
Druckabfall	$32,5 \text{ Pa}$	$8148 \text{ Pa}$	$318 \text{ Pa}$
Mittlere Geschwindigkeit	$25 \text{ cm s}^{-1}$	$1,3 \text{ cm s}^{-1}$	$0,16 \text{ mm s}^{-1}$
Aufenthaltsdauer	$1,5 \text{ s}$	$0,15 \text{ s}$	$6,3 \text{ s}$

Abb. 3,6: Daten zur Blutströmung

## 3.3 Druckwellen

### 3.3.1 Windkesselfunktion der Aorta

Die Bezeichnung Windkessel stammt von der Feuerwehr im Mittelalter. Bereits damals hatte man erkannt, daß ein kontinuierlicher Wasserstrahl trotz diskontinuierlicher Pumpen durch einen *Luftpolster* im Kessel zu erreichen war (Abb. 3.7) Diese elastische Begrenzung der Wasseroberfläche wurde bei erhöhtem Zufluß komprimiert. Auch die Effektivität einer Pumpe ist bei kontinuierlichem Fluß größer, was sich leicht an einem Modell zeigen läßt (Abb. 3.8).

Nach diesem Modell wird der günstige Einfluß der Aortenelastizität verständlich, der nicht nur für einen kontinuierlicheren Fluß sorgt, sondern auch die Effektivität des Herzens steigert.

### 3.3.2 Ausbreitung der Pulswelle

Direkt hinter dem Herzen findet eine elastische Dehnung der Wand statt und somit wird Energie gespeichert. Da nun hier ein höherer Druck gegenüber den nachfolgenden Abschnitten herrscht, wird das Blut in Richtung des Druckgefälles beschleunigt, wobei die gespeicherte Energie an das Blut abgegeben wird. Abb. 3.9 zeigt die Ausbreitung einer solchen Druckwelle schematisch.

Die Welle pflanzt sich als transversal elastische Welle über das gesamte Gefäßsystem aus und ist an bestimmten Körperstellen gut tastbar (Halsschlagader oder Innenseite des Handgelenks).

Aus der Stärke, dem Anstieg und der Frequenz der Pulswelle kann der erfahrene Arzt wichtige Rückschlüsse auf krankhafte Veränderungen ziehen.

Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit hängt von der Elastizität ab. Je weiter dabei die Wand ausschwingt, desto länger dauern Speicherungs- und Entspeicherungsvorgänge, daher ist die Fortpflanzungsgeschwindigkeit geringer.



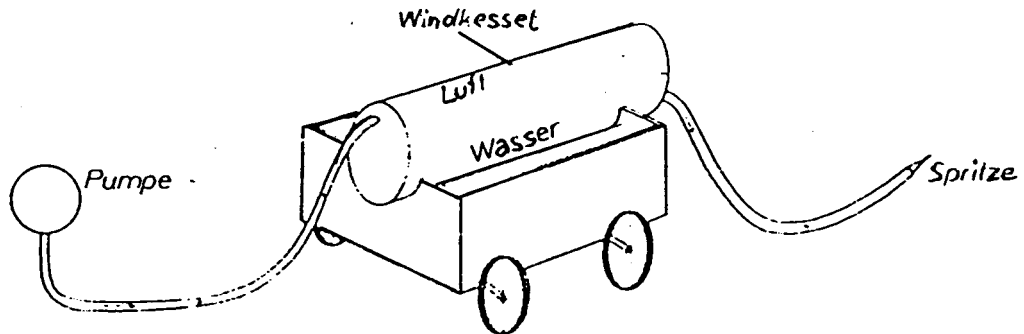


Abb. 3,7: Prinzip des Windkessels

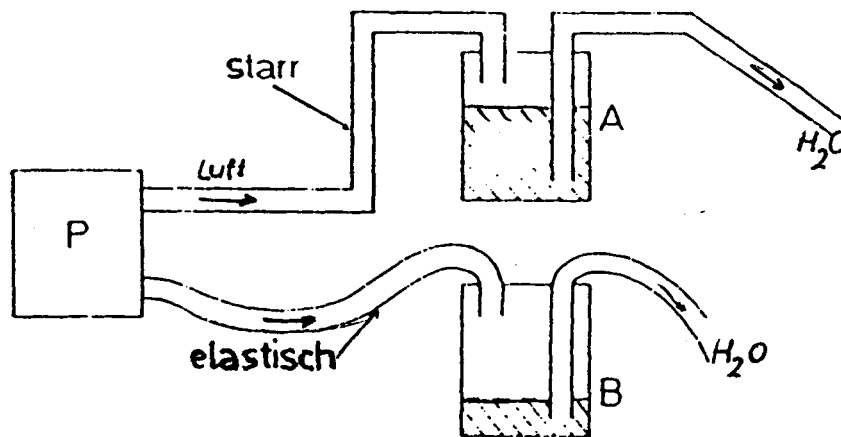
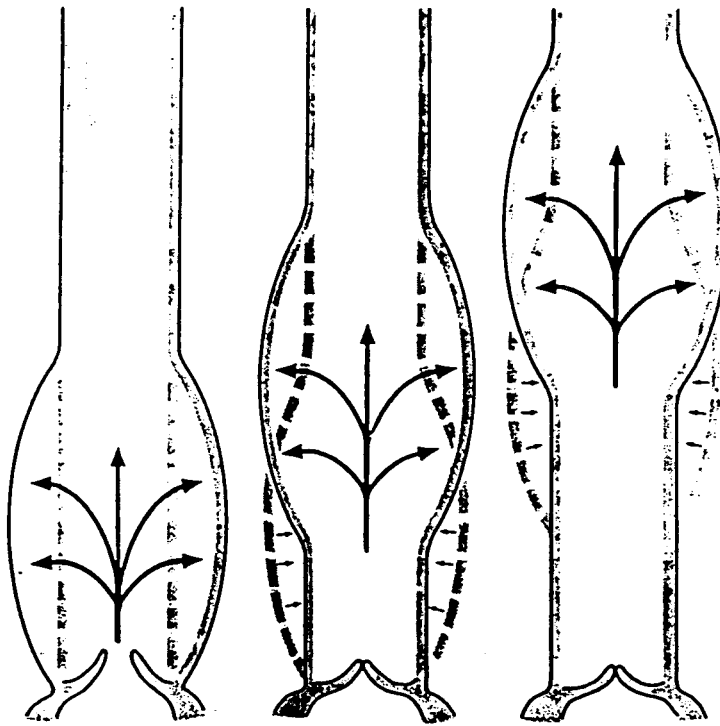


Abb. 3,8: Experiment zur größeren Effektivität einer kontinuierlich arbeitenden gegenüber einer diskontinuierlich arbeitenden Pumpe.



**Abb. 3,9:** Schematische Darstellung der Windkesselfunktion und Ausbreitungsmechanismus der Pulswelle. Der systolischen Dehnung der Aortenwand mit einer Speicherung von Blut (links) folgt eine Entdehnung mit Entspeicherung. Wiederholung der Vorgänge, die sich kontinuierlich über die elastischen Arterien fortsetzen.

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit  $v$  der Pulswelle bestimmt sich durch [10]:

$$v = \text{Wurzel aus } \kappa/\rho$$

$$\rho = \text{Dichte des Blutes}$$

$$\kappa = dp/dV \cdot V \text{ (Volumenselastizitätsmodul)}$$

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Pulswelle ist wegen der Impulsübertragung von Teilchen zu Teilchen wesentlich größer als die Strömungsgeschwindigkeit des Blutes. So erreicht die Pulswelle bereits nach 0,2 s die Arteriolen des Fußes, während die Flüssigkeitsteilchen gerade in der Aorta angekommen sind [10].

In zunehmenden Alter wird  $\kappa$  größer, was meist auf Ablagerungen in den Gefäßen zurückzuführen ist. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit wird dadurch erhöht und kann bis zu 10m/s betragen (Jugendlicher 5m/s) [10].

### 3.4 Regelkreis

Die Kybernetik befaßt sich mit Prozessen der Kommunikation und Regelung und wurde ursprünglich für immer größer werdende Bereiche der Technik formuliert.

Ihre Anwendung auf lebende Organismen wird als Biokybernetik bezeichnet, die bestrebt ist, biologische Funktionen in ihren Zusammenhängen übersichtlich und häufig auch quantitativ darzustellen.

Regelkreise im menschlichen Körper sind freilich viel zu komplex, um sie im Rahmen dieser Arbeit ausführlich zu behandeln [siehe dazu 10, 15], zumindest der prinzipielle Aufbau soll aber in Bezug auf das Herz- Kreislaufsystem erwähnt werden.

Abbildung 3.10 zeigt eine schematische Darstellung. Als Regelstrecke bezeichnet man dabei den Ort, an dem irgendeine Größe geregelt werden soll; beim Kreislauf ist die Regelstrecke das Gefäß.

Die Regelgrößen sind z.B. Blutdruck oder Temperatur, die geregelt auf einem bestimmten Sollwert gehalten werden sollen. Zur Messung des Istwertes dienen Meßfühler (Rezeptoren, die den Funktionszustand des Kreislaufs an verschiedensten Körperstellen messen), die den Meßwert in irgendeiner Form (meist elektrische oder chemische Impulse) an den Regler (Sollwert-Istwert- Vergleicher) weiterleiten.

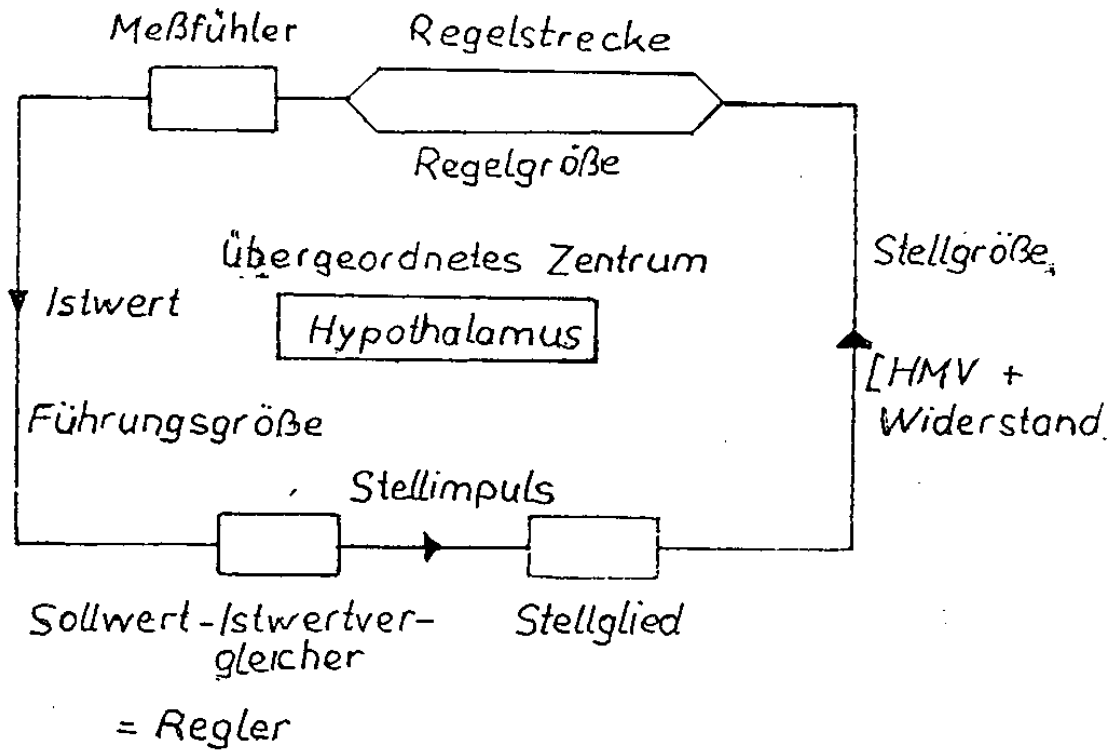


Abb. 3,10: Schematische Darstellung des Regelkreises im Herz- Kreislaufsystem

Stellt dieser eine Differenz fest, erfolgt ein Stellimpuls an das Stellglied. Bei der Blutdruckregulation sind diese Stellglieder das Herz und die Gefäßmuskelfasern, die eine konkrete Veränderung herbeiführen. Die Stellgröße ist letztlich die Größe, die geändert werden muß, um die Regelgröße konstant zu halten; beim Kreislauf das Herzminutenvolumen bzw. der Gefäßwiderstand. Die Änderung der Stellgrößen führt dann zu der gewünschten Änderung der Regelgrößen.

Im Mittelpunkt der allgemeinen Kreislaufregulationen stehen also Anpassungsvorgänge zwischen totalem peripheren Widerstand und Herzzeitvolumen, die die Größe des Druckgefälles als Voraussetzung für die Strömung im Gefäßsystem bestimmen. Weitere wichtige Anpassungsvorgänge betreffen das Verhältnis zwischen Gefäßkapazität und Blutvolumen, von dem die Größe des statischen Drucks abhängt.

Nach ihrem Wirkungseintritt unterscheidet man in kurz- mittel- und langfristige Reaktionsmechanismen. Kurzfristige Reaktionen zeichnen sich durch ihren schnellen, innerhalb von wenigen Sekunden erfolgenden Wirkungseintritt aus (Steigerung der Pulsfrequenz bei körperlicher Leistungssteigerung, bei Stressreaktionen, bei Erschrecken, Einfluß von Alkohol- und Nikotingenuß und Medikamenten- und Drogeneinnahme).

Auch den mittel- und langfristigen Reaktionsmechanismen sind natürlich durch den speziellen Aufbau unseres Körpers und den chemischen, biologischen und physikalischen Vorgängen Grenzen gesetzt. So wie allgemein in der Natur auch, gilt es diese Grenzen zu erkennen und einen bis jetzt noch nicht behandelten Körperteil, nämlich unser Gehirn, zu gebrauchen, um diese Grenzen nicht mutwillig und oft irreperabel zu überschreiten!

## 4. Anwendung im Unterricht

### 4.1. Didaktische Überlegungen

Die allgemeinen Bildungs- und Lehraufgaben des Lehrplans für Physik beinhalten unter anderen auch die "Fähigkeit, erworbene Kenntnisse auf verwandte Probleme anzuwenden und Analogien zu erkennen".

Da Physik von den Schülern oft als zu trocken, lebensfremd und von Mädchen meist auch als zu technisch empfunden wird, könnte mit dem Themenbereich des menschlichen Herz- Kreislaufsystem demonstriert werden, daß die *Lehre der unbelebten Materie* sehr wohl Erklärungs- und Aussagekraft für den lebenden Organismus besitzt. Wenn auch mit Einschränkungen, aber die "Kenntnis der physikalischen Modellvorstellungen und ihrer Aussagekraft" [Zitat Lehrplan] wird ja ohnehin in den fachspezifischen Zielen des Lehrplans formuliert.

Vielfach werden dem Schüler vereinfachte Modelle präsentiert, um ihn zu einem grundlegenden Verständnis der behandelten Problematik zu führen, ohne ihn aber auf die Simplifizierung genügend aufmerksam zu machen. Das Ergebnis ist nicht selten totale Verwirrung statt der angestrebten Erkenntnis.

Das Fach Biologie beinhaltet in seinen übergeordneten Lehrzielen die Gesundheits-erziehung, ein Aspekt, der sich durch alle Jahrgänge fortsetzt. Ebenso die Berufsbil- dung, die auch die mit dem Beruf verbundene (körperliche) Belastung besprechen sollte.

Beide Bereiche könnten sinnvoll durch eine physikalische Betrachtungsweise, im speziellen des Herz- Kreislaufsystems, ergänzt werden.

Gestützt auf den Lehrplan ist dabei eher an eine Vertiefung und Wiederholung der biologischen Kenntnisse gedacht, da das gleichzeitige Bearbeiten des Themas im Lehrplan klassenmäßig nicht zusammenfällt.

So wird der Herzaufbau und der Körperkreislauf in kurzen Zügen in der 4.Klasse be- handelt, um dann im darauffolgenden Jahr (5.Klasse) näher behandelt zu werden. Dabei wird genauer auf die Funktionen des Körperkreislaufs eingegangen, die

Druckverhältnisse in den einzelnen Gefäßabschnitten besprochen, Viskosität des Blutes und Bedeutung der Osmose für das Lymphsystem behandelt.

Aufbauend auf diesen Kenntnissen könnte sich in der 6. Klasse die Physik der Hydromechanik (streng lehrplanmäßig allerdings nur in den RG/DG und RG/Ph,Ch,BU vorgesehen) anschließen, die die Strömungsverhältnisse und den *mechanischen* Teil des Herzens näher untersuchen.

In den nachfolgenden beschriebenen Experimenten (Schülerarbeitsblätter) wird so die Pulsfrequenz und der Blutdruck selbständig bestimmt und die Belastbarkeit des Organismus diskutiert. Alltagserfahrungen des Schülers in seiner Familie mit Bluthoch- oder niedrigerem Blutdruck könnten an dieser Stelle vom Schüler eingebracht werden.

Auch die Auswirkungen von z.B. Zigaretten- oder Alkoholkonsum auf die Gefäße und damit auf das Herz wären hier angebracht. Nach der Behandlung der Schwingungen und Wellen ist, wenn auch wahrscheinlich nur qualitativ, das Abrunden des Themas mit der Betrachtung der Pulswelle denkbar.

Ebenfalls in der 6. Klasse ist im Fach Biologie die Behandlung der Neurobiologie vorgesehen. Die Wirkungsweise der Natrium - Kalium - Pumpe, das Membranpotential mit einem Vergleich zum Kondensator und die Ursachen des Aktionspotentials werden erklärt.

Darauf basierend lassen sich in der 7. Klasse (wiederum nur im Schultyp RG und RG/BU,Ph,Ch) nach der Einführung der Elektrostatik die elektrischen Phänomene des menschlichen Herzens vertiefen.

Das Herz als Dipol und die Ausbreitung des elektrischen Feldes sind wiederum Voraussetzungen um eine der heute gebräuchlichsten Untersuchungsmethoden (EKG) zu verstehen. Die Vorgänge an der Zellmembran sollen durch leicht durchschaubare Versuche gezeigt werden (s. Arbeitsblätter).

Neben diesen fächerübergreifenden Aspekten sollten aber immer wieder auch Querverbindungen und Analogien *innerhalb* der Physik aufgezeigt und besprochen werden. So z.B. bei dem Begriff der Herzarbeit, Herzleistung und Effizienz (Vergleich mit anderen *Maschinen*), Energie, Energieumwandlung- und -erhaltung und Gesetzmäßigkeiten bei elektrischem und hydrodynamischem *Gleichstrom*.

Abschließend sei bemerkt, daß die Behandlung des gesamten Themenbereichs wahrscheinlich nur in wenigen Lehrplankonzeptionen möglich ist, einzelne Teilbereiche aber als Motivationsgrundlage sicherlich einbaubar wären.

Bei den nachfolgend beschriebenen Experimenten geht es nicht darum, medizinisches Fachwissen zu vermitteln und schon gar nicht darum, pathologische Veränderungen feststellen zu können - beides muß dem erfahrenen Arzt vorbehalten bleiben.

Vielmehr soll der Schüler mit den häufigsten Untersuchungsmethoden vertraut werden und diese im Prinzip verstehen lernen. Ein letzter aber nicht unwesentlicher Aspekt ist auch die Sensibilisierung gegenüber dem eigenen Körper, dem im Rahmen dieses Themas Raum und Zeit gelassen werden sollte. Dafür muß die Möglichkeit gegeben sein, mit möglichst vielen Sinnen Eindrücke aufzunehmen und zu verarbeiten ( *Spüren und Tasten* der Pulsfrequenz und des Herzschlags und der Druckverhältnisse an geeigneten Schlauchmodellen, *Hören* der Herztöne und der Strömungsgeräusche mittels Stethoskop oder geeigneter Apparatur, *Sehen* von Strömungsbildern, Wellenbewegungen, Wirbelbildungen, Auswirkung von Verzweigungen und Wiedervereinigung von Systemen).

Um letztgenannte Rahmenbedingungen im Klassenzimmer zu schaffen, kann freilich keine Anleitung im Rahmen dieses Kapitels erfolgen. Zu viel hängen diese Bedingungen von Faktoren wie Gesprächs- und Vertrauensbasis zwischen Lehrer und Schülern ab; von der Bereitschaft, sich auf Situationen einzulassen, ohne deren geplanten Ablauf im voraus zu kennen; von der Fähigkeit zu *empfinden*, seine Gefühle zuzulassen und auf sie zu vertrauen; zusammenfassend also von persönlichkeitsimmanenten und gruppenstrukturellen Charakteristika.

Letztlich sollte auch herausgearbeitet werden, daß die Physik *einen* möglichen Zugang zu diesem Thema darstellt, bei weitem aber nicht den einzigen. Auch der beste Physiklehrer kann nicht erklären, warum einem das *Herz vor Freude übergehen* oder sich *vor Schmerz zusammenziehen* kann - erklären wohl nicht, aber fühlen doch hoffentlich!



## **4.2 Arbeitsvorlagen:**

### **Lehrer - und Schülerinformationsblätter zu Herzfrequenz und Blutdruck**

Die nachfolgenden Arbeitsvorlagen sind direkt als Kopievorlagen für den Unterricht gedacht, weshalb bewußt auf eine der vorliegenden Arbeit angepaßten Numerierung verzichtet wurde.

Die Lehrerinformationen enthalten zusätzliche Erklärungen zu den Schülerarbeitsblättern, um auch auf eventuell zusätzlich auftretende Schülerfragen eingehen zu können.

# Der Blutdruck

## Inhalt:

Die Messung des Blutdrucks unter physikalischen Gesichtspunkten.

## Zielsetzung:

- Druckbegriff einmal *anders*
- Handhabung und Ablesung von Anzeigegeräten; Umrechnung verschiedener physikalischer Einheiten
- Relevanz physikalischer und biologischer (Schul)Kenntnisse aufzuzeigen
- Eine der wohl am häufigst verwendeten medizinischen Standarduntersuchung zu durchschauen

## Material:

Handelsübliches Blutdruckmeßgerät (kann bei Arzt oder Rotem Kreuz ausgeborgt werden).

## Meßprinzip zur Bestimmung des Blutdrucks

Soll der arterielle Blutdruck bestimmt werden, wird eine Armarterie in Herzhöhe mittels der Armmanschette des Blutdruckmeßgeräts soweit zusammengedrückt, daß kein Blut mehr fließen kann. Nun wird der Druck in der Armmanschette erniedrigt, bis die Druckspitze der Pulswelle die Arterie kurzzeitig öffnen kann. In der Manschette herrscht jetzt ein Druck, der mit dem Systolendruck gleichzusetzen ist.

Infolge der erhöhten Geschwindigkeit an der Engstelle entstehen Turbulenzen, die Geräusche verursachen, die mit einem Stethoskop hörbar sind. Man kann sie wahrnehmen, solange der Diastolendruck kleiner als der Druck in der Manschette ist. Sobald das Blut wieder laminar durch die Arterie fließen kann, ist über das Stethoskop auch kein Pochen mehr zu hören. Das Ausbleiben des Geräusches gibt das Maß für den Diastolendruck an.

Die folgenden Arbeitsbögen zur Messung des Blutdrucks wurden aus Naturwissenschaft im Unterricht/Physik 1990/1 Seite 27 - 30 entnommen und um einige Ergänzungen erweitert.

Die Schüler sollen dabei ihren eigenen Blutdruck messen und die Werte in das Arbeitsblatt eintragen. Wieso oberhalb eines bestimmten Drucks nichts mehr zu hören ist, ist auch intuitiv klar. Warum aber die Geräusche unterhalb eines bestimmten Drucks verschwinden, ist an dieser Stelle sicher nicht einzusehen, was hoffentlich zu einem erhöhten Anreiz für den darauffolgenden Kreislaufversuch führt.

## Experiment zum Körperkreislauf

Bei diesem Versuch setzen sich die Schüler zuerst mit der Arbeitsweise des Herzens auseinander. Das Herz wird dabei als Ort der Druckerzeugung erkannt. Die Kraft, die normalerweise der Herzmuskel übernimmt, ist hier durch die Fingermuskel, die auf den Kolben drücken, ersetzt.

Die Analogien der einzelnen Schlauchabschnitte mit den Arterien, Kapillaren und Venen werden erarbeitet. Es ist auch auf die Reduzierung des Modells gehörig aufmerksam zu machen. So fehlt der gesamte Lungenkreislauf, die Vorhöfe und die vielen parallelen Kreisläufe des lebenden Organismus.

Beim Abhören mit dem Stethoskop stellen die Schüler fest, daß die Herztöne vom Schließen der Ventile herrühren, was auf den Menschen übertragbar ist. Durch Drücken und Fühlen am Schlauch lassen sich auch die beiden Druckwerte recht gut erfahren. Die Flüssigkeit steht offenbar auch unter Druck, wenn keine Kraft auf die Spritze wirkt, was wiederum zur elastischen Kraft des Schlauches (der Aorta) führt.

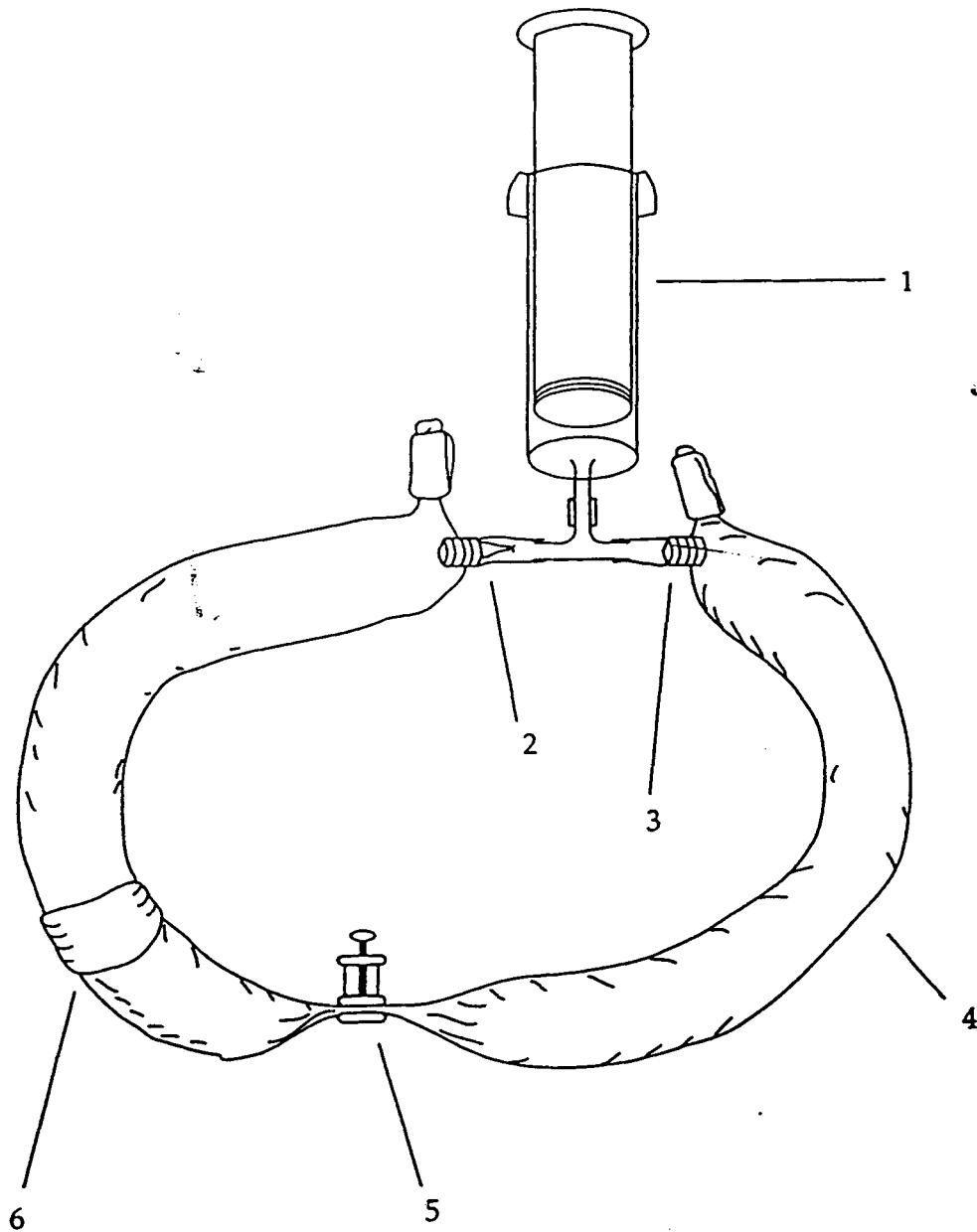
Nach diesem qualitativen Sammeln von Erfahrungen können erste Messungen in kleinen Gruppen am Modell durchgeführt werden. Dabei werden die Kräfte bestimmt, die nötig sind, um den Schlauch ganz zusammenzudrücken (in Analogie zur vorher beschriebenen Blutdruckmessung). An dieser Stelle läßt sich auch das Verschwinden der Geräusche erklären. Vertiefend könnten auch größere Teile des Schlauches mit einem unelastischen Textilband umwickelt werden, um den mit dem Alterwerden verbundenen Elastizitätsverlust der Gefäße zu simulieren.

Auch das plötzliche Verengen der Kapillare unter Schock läßt sich recht einfach zeigen, indem die Schlauchklemme noch enger gestellt wird.

Dieses Modell ist natürlich bei Interesse der Schüler auch zu einem verzweigteren Strömungskreislauf zu ergänzen, wobei an den Verbindungs- und Verzweigungsstellen kurze, durchsichtige Plastikröhrchen einbaubar wären, um den Strömungsverlauf auch sichtbar zu machen. Verwendet man reines Wasser, hat sich der Zusatz von feinem Aluminiumpulver zum Sichtbarmachen und Glycerin zur Verlangsamung der Strömung als erfolgreich erwiesen.

### Bauanleitung

Die Einzelteile des Modells können beim Fahrradhändler erstanden werden. Für die genaue Bauanleitung siehe H. Kruse in NiU 1990/1 Seite 30



**Abb. 4,1:** Kreislaufmodell

1. Spritze; 2. Einlaßventil; 3. Auslaßventil; 4. Fahrradschlauch; 5 Schlauchklemme; 6. Textilklebeband zur Sicherung der Klebestelle zwischen beiden Schläuchen

## Anmerkungen zur Diagnostik

Der Blutdruck ist keine konstante Größe sondern von Alter, Geschlecht, psychischen Einflüssen, körperlicher Gesamtverfassung, Schmerzempfindungen, Schlafentiefe und von Lageänderungen abhängig. Nachfolgend sollen kurz die wichtigsten Erkrankungen beschrieben werden [17]:

1. Arteriosklerose bedeutet eine Ablagerung von Stoffwechselprodukten in die Arterienwand. Die Folgen sind eine Zunahme der Wanddicke, die Abnahme der Wandelastizität und die Abnahme der Gefäßweite, was wiederum zu Durchblutungsstörungen, Arterienverschlüssen und Infarkten führen kann.
2. Bluthochdruck ist ständig systolisch über 160 und diastolisch über 95 mm Hg. Bei fast 80% der Erkrankungen ist die Ursache unbekannt.
3. Blutunterdruck ist systolisch ständig unter 100 und diastolisch unter 60 mm Hg. Blutunterdruck ist meist nur unangenehm und läßt sich durch körperliches Training therapieren.
4. Beim Schock liegt eine lebensgefährliche Störung des Kreislaufes vor. Ursachen sind meist Blutvolumenverlust (Blutung, Verbrennung, extremer Flüssigkeitsverlust) oder allergischer Schock (Volumensverlust über undicht werdende Kapillare ins Gewebe). Infolge der Gegenregulation des Kreislaufes ist der Blutdruck anfänglich noch normal. Bei Andauern des Schockzustandes kommt es trotz schnellen Pulses zu einem Blutdruckabfall. Durch den lange dauernden Stillstand des Blutes in den Kapillaren kommt es zu einem Verklumpen der Blutkörperchen, akutes Nierenversagen kann die Folge sein.
5. Periphere Durchblutungsstörungen kommen in den Venen und in den Arterien vor. Die Thrombose ist ein Blutgerinnsel (Blutpfropf), der in einer Vene entsteht, Entzündungen können hinzukommen. Bei der Entstehung spielen die Schädigung der Gefäßwand, die Verlangsamung der Strömung und die Erhöhung der Gerinnungsneigung des Blutes eine wesentliche Rolle. Löst sich ein Thrombus von seiner Entstehungsstelle und wird mit dem Blutstrom in den großen oder kleinen Kreislauf getragen, spricht man von Embolie (Lungenembolie, Gehirnembolie). Akute Verschlüsse in den Arterien sind zu 90% von einem Embolus hervorgerufen. Der Embolus (Thrombusteil, Fett oder Luft) verschließt dabei die Arterie, sobald der Gefäßquerschnitt kleiner als sein Durchmesser ist. In den anschließenden Geweben kommt es durch Sauerstoffmangel zu einem Gewebsschaden.

## Der Blutdruck

Wie Wasser in der Wasserleitung muß auch das Blut in den Adern unter einem gewissen Druck stehen, um fließen zu können. Ist zum Beispiel der Druck in den Wasserleitungen eines Hochhauses zu niedrig, erhalten die oberen Stockwerke kein Wasser mehr.

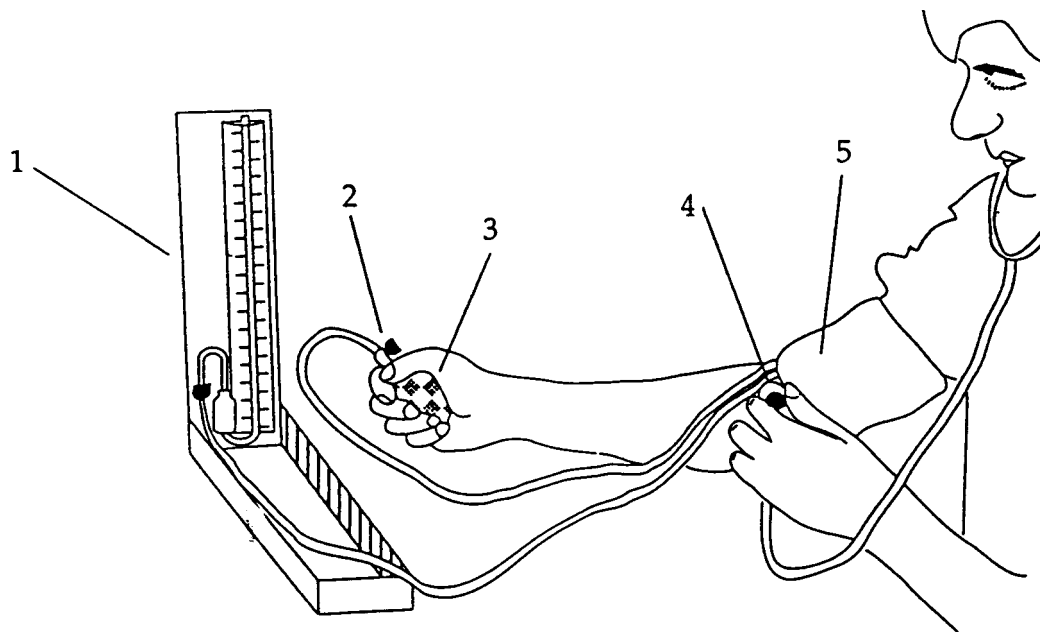
Gleiches gilt für unser Blut: Sinkt sein Druck unter einen bestimmten Mindestwert ab, dann wird meist die Blutversorgung des Gehirns zuerst beeinträchtigt - wir werden ohnmächtig.

Wenn wir hart arbeiten oder uns intensiv sportlich betätigen, steigt der Blutdruck an. Das hat zur Folge, daß mehr Blut rascher die Muskeln versorgen kann.

Der Blutdruck wird immer durch zwei Zahlen angegeben, zum Beispiel 130/80. Die erste Zahl nennt den Druck, der bei der Kontraktion (Systole) der Herzkammer auftritt. Die zweite Zahl gibt den Druck während der Erweiterung (Diastole) des Herzens an.

### Aufgabe

- Führe die Messung wie auf dem nachfolgenden Arbeitsblatt beschrieben durch
- Wiederhole deine Messung nach einer Minute Kniebeugen - wenn du außer Atem bist, war es genau richtig!
- Notiere und vergleiche deine Meßwerte
- Überlege, welche Umstände noch zu einer Blutdruckerhöhung führen könnten. Fallen dir auch Gründe für eine Blutdruckerniedrigung ein?
- Diskutiere deine Ergebnisse in der Klasse.



**Abb.4,2:** Die eigentliche Blutdruckmessung

- Lege die Manschette um deinen nackten Oberarm und befestige sie so, daß die Ellenbogenbeuge frei bleibt.
- Drücke das Stethoskop auf die Ellenbogenbeuge
- Erhöhe jetzt durch Aufpumpen der Manschette den Druck solange, bis deine Schlagader vollständig abgeklemmt ist. Dies ist bei 26 kPa bzw. 200 mm Hg bestimmt der Fall.
- Verringere langsam den Druck, indem du mit Hilfe des Ventils Luft aus der Manschette abläßt, und achte dabei auf die Geräusche im Stethoskop. Bei einem bestimmten Druck, den man den *oberen Blutdruckwert* nennt, werden die Pulsschläge in der Schlagader hörbar.
- Lasse noch mehr Luft aus der Manschette ab, bis das Pochen nicht mehr zu hören ist. Der jetzt eingestellte Druck heißt der *untere Blutdruckwert*.



Bild 1: Die Arterie ist vollständig abgeklemmt.

Bild 2: Der Druck in der Manschette ist verringert, die Arterien öffnet sich kurzzeitig, im Stethoskop wird das Pochen hörbar.

Bild 3: Der Druck in der Manschette ist soweit gesenkt, daß die Arterie ständig geöffnet bleibt. Das Pochen hört auf.

a: Arterie; b: Manschette; c: Stethoskop; d: Blasebalg; e: Manometer

**Ergebnis der Messung**

Oberer Blutdruckwert

\_\_\_\_\_ kPa entspricht \_\_\_\_\_ mm Hg

Unterer Blutdruckwert

\_\_\_\_\_ kPa entspricht \_\_\_\_\_ mm Hg

1 mm Hg entspricht 0,133 kPa.

Wiederholung der Messung nach

1 Minute Kniebeugen

Oberer Blutdruckwert

\_\_\_\_\_ kPa entspricht \_\_\_\_\_ mm Hg

Unterer Blutdruckwert

\_\_\_\_\_ kPa entspricht \_\_\_\_\_ mm Hg

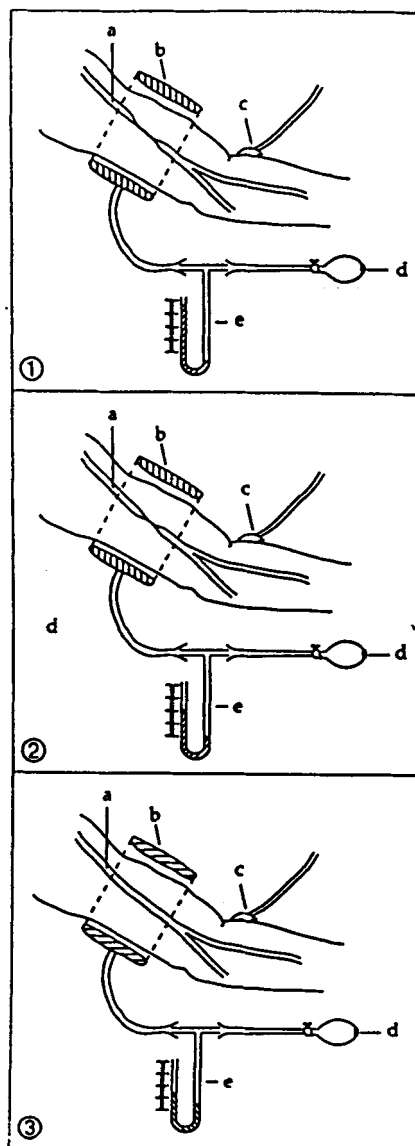


Abb. 4,3: Blutdruckmessung

## Unser Körper - ein ausgeklügelter Regelkreis

Wie reguliert unser Körper den Blutdruck? Wie paßt er ihn den jeweiligen Erfordernissen an?

Die Regulation des Blutdruckes ist ein Beispiel für einen Regelkreis, wie man in der Informationstechnik ein System miteinander verknüpfter Meß-, Steuer- und Arbeitseinheiten nennt.

In der großen Halsschlagader befinden sich hochempfindliche Zellbereiche, die auf Druckunterschiede reagieren. Sie senden über Nervenleitungen ständig Informationen über den jeweiligen Blutdruck ans Gehirn.

Andere Meßstationen an den Halsschlagadern sind mehr chemisch orientiert. Sie analysieren in Sekundenbruchteilen den Säuregrad des Blutes, sowie seinen Gehalt an Kohlendioxid und Sauerstoff. Auch diese Daten gelangen an das Gehirn.

Stimmt der Blutdruck nicht mit den Erfordernissen überein, dann sendet die Steuer- und Regelzentrale im Gehirn Signale. Diese gelangen wiederum über Nervenleitungen zu den Muskelzellen: die Blutgefäße ziehen sich zusammen oder erweitern sich und damit steigt oder fällt der Blutdruck!

Die Muskeln der Gefäßwände arbeiten dann solange, bis die Meßstationen der Zentrale melden können, daß der gewünschte Zustand erreicht ist. Man sagt: der *Ist - Wert* entspricht dem *Soll - Wert*.

### Frage

Regelkreise sind in der Technik sehr wichtig, aber auch in unserer täglichen Umgebung erleichtern Regelkreise unser Leben.

Fallen dir Beispiele dazu ein?

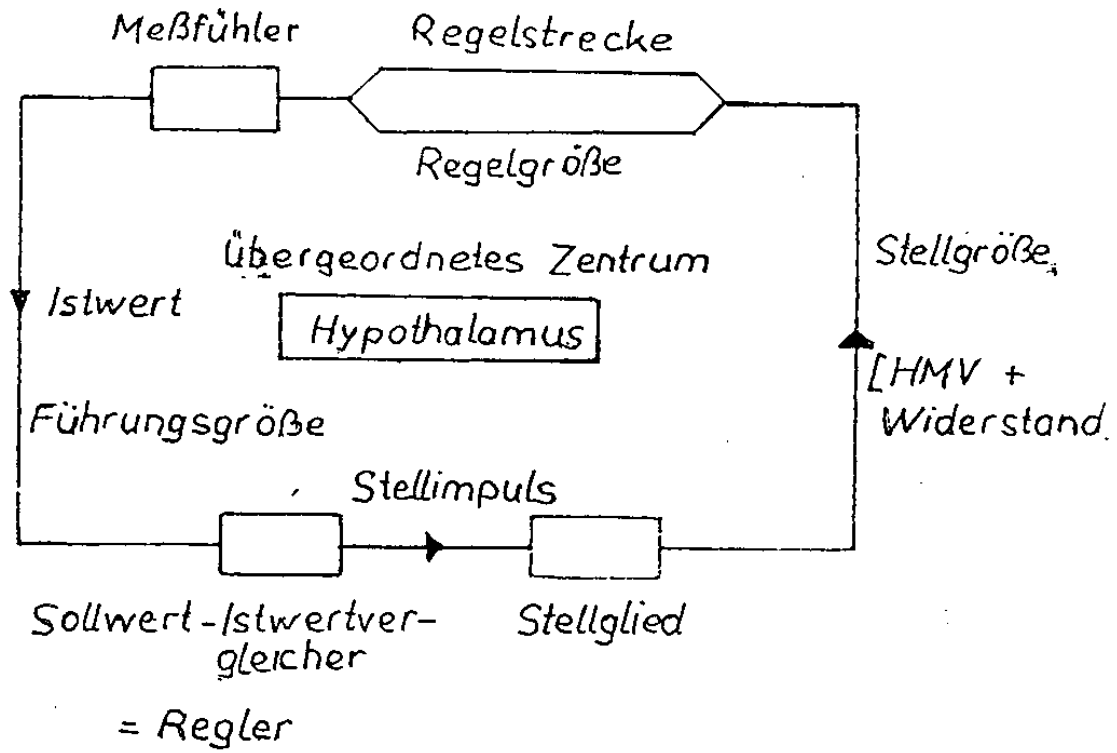


Abb. 4.4: Schematische Darstellung des Regelkreises im Herz-Kreislaufsystem des Menschen

# Das Herz - eine Superpumpe?

## Inhalt:

Berechnung von Herzarbeit und Herzleistung

## Zielsetzung:

- Relevanz der physikalischen Begriffe Arbeit, Leistung und Energie aufzuzeigen
- Vorstellung von der Größenordnung der Herzarbeit zu bekommen
- Exaktes Arbeiten mit physikalischen Einheiten üben
- Interpretieren von Ergebnissen

## Herzenergetik

Die vorliegende Arbeitsvorlage rundet das Thema **Herz** ab, und soll dem Schüler Einblick in die Größenordnungen der Vorgänge in seinem eigenen Körper vermitteln.

Die wichtige und lebensnotwendige Funktion des Herzens soll erkannt werden. Darüber hinaus aber sollte die Notwendigkeit der Gesunderhaltung dieses Organs diskutiert werden - Möglichkeiten dazu in Verbindung mit Biologie aufzeigen.

Aus physikalischer Sicht sollen Schüler bereits bekannte Formeln auf neue Sachsituationen anwenden lernen, Formeln eigenständig aufstellen, einfache Zahlenwerte einsetzen und ihre Ergebnisse interpretieren lernen. Auf die Verwendung der geeigneten physikalischen Einheiten ist Bedacht zu nehmen.

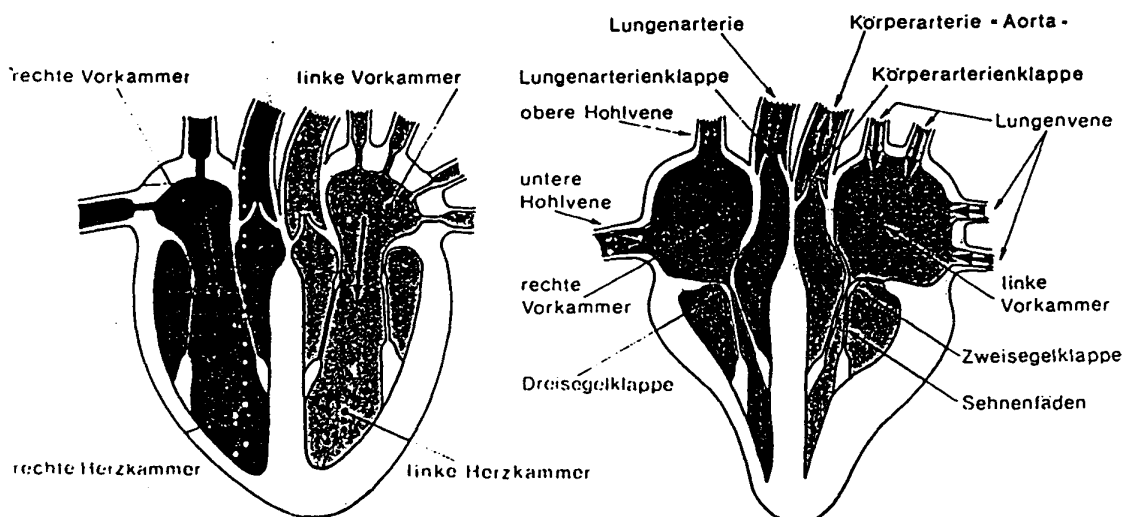
Die Schüler sollten mit Einheiten aber nicht nur *hantieren* können, sondern auch eine gewisse *Vorstellung* damit verbinden, was durch Vergleiche mit Werten aus ihren Alltagserlebnissen versucht werden soll.

# Das Herz - eine Superpumpe?

## Herzarbeit

Das Herz ist ein kräftiger Hohlmuskel, der im Laufe unseres Lebens eine beträchtliche Menge Blut durch unseren Körper pumpt. Natürlich muß das Herz dabei Arbeit verrichten. Wir wollen nun abschätzen, in welcher Größenordnung diese *Herzarbeit* liegt.

Wir überlegen dafür, was bei einem Herzschlag passiert: ziehen sich die Herzkammern zusammen (Systole), wird dabei eine bestimmte Blutmenge (Schlagvolumen) in die Arterien gepumpt. Zur Überwindung des Reibungswiderstandes in den Gefäßen ist dazu ein bestimmter *Druck* notwendig. Daher bezeichnen wir diesen Anteil an der Herzarbeit auch als *Druck-Volumenarbeit*.



**Abb.4,5.:** Die Arbeitsweise des Herzens; Querschnitt durch das Herz

Das Blut, das durch das Herz auf eine bestimmte Geschwindigkeit  $v$  gebracht wird, hat natürlich auch eine gewisse Masse  $m$ . Diese Arbeit wird daher auch als *Beschleunigungsarbeit* bezeichnet. Allerdings ist die Arbeit, die nötig ist, um dem Blut eine Geschwindigkeit zu erteilen vernachlässigbar klein (ca. 1% der Gesamtarbeit). Wir beschränken uns also bei unserer Abschätzung auf die Druck-Volumenarbeit und auch dabei begnügen wir uns mit Mittelwerten (da sich während einem Herzschlag das Volumen als auch der Druck ständig verändern, wäre eine genauere Berechnung etwas kompliziert).

## Fragen

1. Welche Arbeit verrichtet das Herz pro Herzschlag?

Für die Druck-Volumen-Arbeit gilt:  $W = p \cdot V$

Dabei nehmen wir folgende Mittelwerte pro Herzschlag an:

$p = 100 \text{ mm Hg}$ , das entspricht  $100.133 \text{ N/m}^2$

$V = 80 \text{ ml}$  das entspricht  $80 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$

Berechne die Arbeit pro Herzschlag!

2. Das Herz eines gesunden Erwachsenen in Ruhe, also ohne körperlicher Anstrengung, schlägt rund 75 mal pro Minute.

Berechne die Herzarbeit pro Minute, indem du den vorher berechneten Wert vernünftig rundest!

3. In welcher Einheit wird Arbeit angegeben?

4. Ein Vergleich: Wie oft mußt du eine Hantel mit einem Gewicht von 1 kg in einer Minute heben, um die gleiche Arbeit zu verrichten wie dein Herz pro Minute? Nimm dabei für die Höhe, die du die Hantel hebst, 50 cm an!

5. Wie oft schlägt dein Herz, wenn du annimmst, daß du 60 Jahre alt wirst?

6. Welche Arbeit verrichtet es in diesen 60 Jahren?

7. Welches Gewicht könnt man mit dieser Arbeit 10 m hoch heben? (Anleitung: runde die Herzarbeit auf eine Kommastelle und setze für  $g = 10 \text{ m/s}^2$ . Falls es dich interessiert, kannst du das berechnete Gewicht in Tonnen umwandeln - das Ergebnis wird dich überraschen!)

## Herzleistung

Jede Zelle deines Körpers braucht Energie, um ihre Aufgabe in deinem Körper erfüllen zu können. Daher werden energiereiche Nährstoffe aufgenommen, umgesetzt und schließlich energieärmere Stoffwechselendprodukte ausgeschieden. Die dabei freiwerdende Energie verwendet dein Körper für zwei Arbeitsbereiche:

1. Arbeit, die deine Zellen verrichtet, ohne daß du darauf wesentlich Einfluß nehmen kannst. Die meisten Tätigkeiten dieser Zellen sind dir nicht einmal bewußt, denn du denkst wohl kaum ständig daran, ob deine Leber, dein Gehirn, dein Herz und deine Niere richtig funktionieren! Diese Arbeit des Körpers, die notwendig ist um die Lebensfunktionen eines Menschen in Ruhe in einer gewissen Zeit aufrecht zu erhalten, wird daher als Grundumsatz bezeichnet.
2. Jede bewußte Bewegung deines Körpers (z.B. Kopfschütteln, wenn es ans Zimmeraufräumen geht), erfordert natürlich auch Arbeit deiner Zellen. Die Arbeit die dein Körper- z.B. in einer Turnstunde- verrichtet, wird daher als Arbeitsumsatz bezeichnet.

## Fragen

Wir beschäftigen uns nun mit dem Energieumsatz des Herzens und wollen uns überlegen, in welchem Verhältnis dieser zu unserem Grundumsatz steht.

Der Energieumsatz, also Energieaufwand pro Zeiteinheit, wird üblicherweise in Joule pro Sekunde [ J/s ] angegeben.

Wenn wir vereinfacht annehmen, daß unser Herz in Ruhe rund 1mal pro Sekunde schlägt, verbraucht es dabei für eine Kontraktion rund 1 Joule pro Sekunde. Zur allgemeinen Versorgung des Herzens sind allerdings noch einmal 5 J/s aufzubringen, also insgesamt 6 J/s.

1. Berechne daraus den Energieumsatz pro Tag! Wandle dein Ergebnis in kJ um.
2. Der Grundumsatz eines Erwachsenen in Ruhe kann grob mit 4 kJ/kg Körpergewicht/Stunde angesetzt werden. Berechne daraus den Grundumsatz eines 50 kg schweren Menschen!

3. In welchem Verhältnis stehen diese beiden Werte? Anders formuliert, wieviel Prozent deines Grundumsatzes verbrauchst du für die Tätigkeit deines Herzens?
4. Das Herz eines Erwachsenen wiegt etwa 300 g. Wieviel Prozent sind das von einem Körpergewicht von 50 kg?
5. Formuliere in eigenen Worten, was für dich die in Punkt 3 und 4 berechneten Werte aussagen! Kann man daraus etwas über die Wichtigkeit des Herzens für unseren Körper aussagen?

Noch eine Schlußbemerkung: Wird die Energiezufuhr des Herzens unterbrochen, steht es nach 6-10 min. still! (Innerhalb von ca. 30 min. ist noch eine Wiederbelebung möglich)

Betrifft die Energieunterbrechung allerdings den ganzen Organismus - z.B. beim Ersticken - ist die Wiederbelebungszeit durch das Gehirn beschränkt und beträgt etwa 8-10 min.!

Versuche also nicht, 8 Minuten die Luft anzuhalten!!



# Die Herzfrequenz

## Inhalt:

Erarbeiten des Themenbereiches Herzfrequenz; Fächerübergreifende Fragestellungen und Diskussionsanregungen.

## Zielsetzung:

- Wiederholung des Frequenzbegriffes; Bestimmung der Herzfrequenz
- Anwendung physikalischer Begriffe auf den Menschen
- Handlungsorientierte Experimente, die zu einem verbesserten Gefühl für den eigenen Körper führen sollten
- Festigung biologischer Vorkenntnisse durch die Wiederholung des Stoffes aus physikalischem Blickwinkel
- Graphiken lesen und interpretieren lernen
- Auswirkungen gesundheitsfördernder Aktivitäten sowie gesundheitsschädliche Ursachen erkennen ; Verantwortungsbewußtseinssteigerung sich und der Gesellschaft gegenüber
- Selbständiges Erarbeiten von Texten und Beantwortung von Fragestellungen
- Durchführung von Messungen und geeigneter Protokollierung

## Material:

Stoppuhr oder Armbanduhr mit Sekundenanzeige; Mikrophon (aus Schülerbaukasten *Elektronik* ), Niederfrequenzverstärker: verwendete Verstärkung  $10^4$ ; schulüblicher Lautsprecher; Oszilloskop: verwendete Einstellungen 5 V/500 ms

## Ergänzende Bemerkungen zur Schülerinformation

Die nachfolgenden Arbeitsblätter dienen dazu, dem Schüler Querverbindungen innerhalb verschiedener Fächer aufzuzeigen und die Anwendbarkeit physikalischer Prinzipien insbesondere in Bezug auf den eigenen Körper aufzuzeigen. Der Sinn liegt dabei keinesfalls auf der diagnostischen Beurteilung, soll dem Schüler aber ein Verständnis für gebräuchliche medizinische Untersuchungen vermitteln. Je nach Interesse kann der Themenbereich *Gesundheitserziehung* - eventuell in Zusammenarbeit mit Leibeserziehungen und Biologie - einbezogen werden.

## Information zur Herzfrequenz

Bei der Beurteilung der Herzfrequenz ist zu beachten, daß der Ruhewert bei Kindern (Neugeborene etwa 145 Schläge pro Minute) höher als bei Erwachsenen liegt. Trainierte Menschen weisen eine niedrigere Frequenz als untrainierte auf (gesundheitsfördernder Einfluß von vernünftiger sportlicher Aktivität!). Psychische Veränderungen und körperliche Arbeit erhöhen die Herzfrequenz, die beim jugendlichen Erwachsenen während maximaler Belastung auf 200/min. ansteigen kann.

## Information zu Herzschall

Die Kontraktion des Herzmuskels und die Klappenbewegungen sowie das in das Herz einströmende und ausströmende Blut erzeugen mechanische Schwingungen. Das Blut selber erzeugt allerdings nur dann zusätzliche Geräusche, wenn es turbulent strömt (im Ruhezustand also kaum, während großer körperlicher Anstrengung oder bei krankhaften Verengungen allerdings schon). Die Herzschwingungen werden über das umliegende Gewebe nach außen geleitet und bewirken ein rhythmisches Schwingen bestimmter Körperoberflächen nahe dem Herzen. Legt man über diese Stellen eine abgeschlossene Luftsicht (Stethoskop), so versetzt die schwingende Körperoberfläche diese Luftsäule ihrerseits in Schwingungen. Die Frequenzen liegen im hörbaren Bereich. Strenggenommen müßte man von Herzgeräuschen und nicht von Herztönen sprechen, da es sich nicht um rein periodische Schwingungen handelt. In der Medizin ist Herzgeräusch aber seit langem für Normabweichungen des Herzschalls reserviert.

## Information zu Aufgaben und Fragen

- Abb. 4,6: entstammt einer 24-Stunden Blutdruckmessung mittels einem ständig angelegten tragbaren Meßgeräts, das auch die Herzfrequenz speichert. Die Erhöhung um 22 Uhr beruhte auf einem heftigen Streitgespräch, zwischen 9-10 mäßiger Dauerlauf.
- Abb. 4,7: der Versuch wurde mit schulüblichen Geräten durchgeführt. Das Mikrophon wurde aus dem Schülerbalkkasten *Elektronik* entnommen; der Niederfrequenzverstärker wies eine Verstärkung von  $10^4$  auf; Einstellung auf Oszilloskop: 5V/500ms (kann auch durch t-y Schreiber ersetzt werden);

# Die Herzfrequenz

## Wir messen unseren Puls

Das Herz eines Erwachsenen schlägt in Ruhe etwa 60 - 100 mal pro Minute. Es pumpt dabei eine bestimmte Menge Blut in die Hauptschlagader (Aorta), die sich in immer mehrere Arterien verzweigt und so das Blut den einzelnen Organen zuführt. Dieses Pulsieren kann man an bestimmten Stellen des Körpers gut erfühlen und so seine Herzschläge zählen - üblicherweise in Schlägen pro Minute.

### Aufgabe

Drücke mit 2 Fingern fest auf die Halsschlagader oder an die Innenseite deines Handgelenks. Bitte deinen Sitznachbarn genau eine Minute mit einer Stoppuhr oder einer Armbanduhr mit Sekundenzeiger für dich zu messen. In dieser Minute zählst du die Anzahl deiner Pulsschläge.

Führe die obige Messung noch einmal durch, nachdem du 20 schnelle Kniebeugen gemacht hast. Ergab sich ein Unterschied in deinen Messungen?

Mein Herzschlag	
Mein Herzschlag nach 20 Kniebeugen	

## Phonokardiogramm - schon mal gehört?

Die Kontraktion des Herzmuskels und das Auf- und Zuschlagen der Ventile, die die einzelnen Kammern voneinander trennen, kann man hören. Wenn der Arzt dein Herz mit einem Stethoskop an bestimmten Stellen abhört, kann er aus der Art der Herztöne gewisse Rückschlüsse auf das richtige Funktionieren deines Herzens ziehen.

Herztöne kann man aber nicht nur hören, sondern sogar sichtbar registrieren. Das geschieht im oben genannten Phonokardiogramm (gr. *Phono* bedeutet dabei Stimme oder Ton; *Kardiogramm* bezeichnet jegliche graphische Aufzeichnung, die mit dem Herzen zu tun hat). Auch daraus kann der erfahrene Arzt natürlich Aussagen über den Zustand des Herzens treffen.

Wir wollen nun versuchen ein einfaches Phonokardiogramm aufzunehmen, bei dem wir unsere Herztätigkeit nicht nur fühlen, sondern auch hören und sehen können!

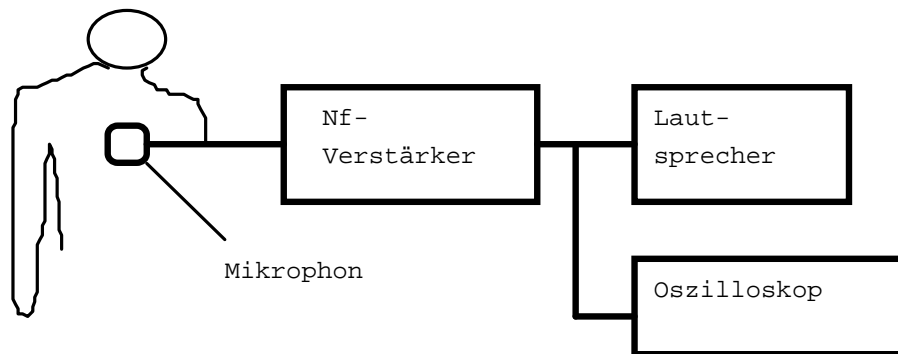


Abb.4,6: Schematischer Versuchsaufbau zu Phonokardiogramm

### Aufgabe

- Überlege und diskutiere kurz den Versuchsaufbau; mache dir eventuell Notizen zur Abbildung 4,6
- Drücke das Mikrofon in Herzgend gegen die nackte Haut. Wahrscheinlich mußt du den Punkt durch Probieren suchen, andem wirklich ein gut hörbarer Herzton zu vernehmen ist. Gleichzeitig sollte am Oszilloskop ein Bild entstehen, das etwa so aussehen könnte:

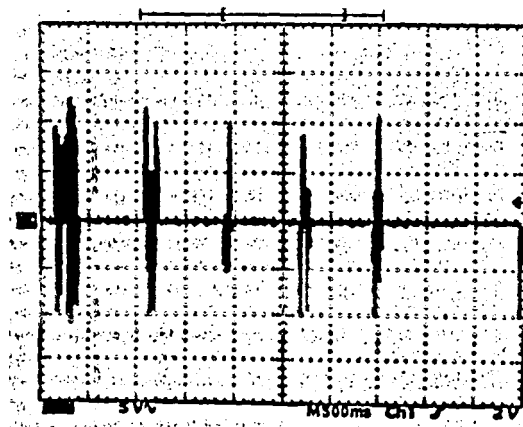


Abb. 4,7: Oszilloskopaufnahme; Herzfrequenz eines 43-jährigen Mannes

**Aufgabe**

- Wiederhole die Formel für Frequenz:  $f =$   
Was sagt diese Formel überhaupt aus?
- In welcher Einheit wird die Frequenz angegeben?
- Bestimme die Herzfrequenz deiner Oszilloskopaufnahme. Die x - Achse ist dabei die Zeit - Achse; wieviel Zeit einem Kästchenabstand entspricht, mußt du auf dem Oszilloskop ablesen (in unserem obigen Beispiel entspricht ein Kästchen 500 ms, also einer halben Sekunde).
- Du hast gerade die Herzfrequenz pro Sekunde berechnet, also wie oft dein Herz in einer Sekunde schlägt. Berechne nun die Anzahl der Schläge in einer Minute und vergleiche diese mit der ersten Messung (Pulsbestimmung mittels Fingerdrücken).

## Wie arbeitet das Herz?

Das Herz ist ein muskulöses Hohlorgan, dessen Größe etwa der Faust des Menschen entspricht. Das Herz ist eine hochwirksame Umwälzpumpe, die sauerstoffreiches Blut von der Lunge zu den einzelnen Organen unseres Körpers transportiert. Andererseits nimmt das Herz sauerstoffarmes Blut auf und pumpt es zur Lunge, wo das Blut wieder mit Sauerstoff angereichert wird. Nahezu alle Zellen unseres Körpers sind von einer dauernden ausreichenden Blutversorgung abhängig. Fehlt diese, dann können die einzelnen Organe ihre Aufgabe infolge Sauerstoff- oder Nahrungsmangels nicht mehr voll erfüllen. Der Motor für diese Blutzirkulation ist unser Herz. Abbildung 4,8 zeigt eine schematische Darstellung des menschlichen Kreislaufsystems, die ein wenig an eine Achterbahn erinnert.

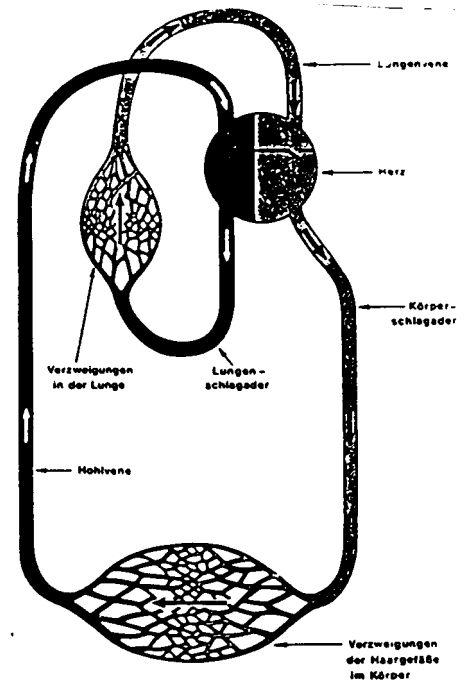


Abb.4,8:  
Eine Rundreise des Blutes durch unseren Körper

## Wieso schlägt unser Herz überhaupt?

Bevor sich ein Muskel zusammenziehen kann, muß er von irgendwoher den Befehl dazu erhalten, er muß erregt werden. Der Herzmuskel bildet die Kontraktionskommandos allerdings selber im sogenannten *Sinusknoten* (Abb. 4,9). Dieser sendet elektrische Impulse über besondere Erregungsleitungen zu den Vorhöfen, wodurch diese sich zusammenziehen und das Blut weiter in die Herzkammern gepreßt wird. Nach einer kurzen Pause erreicht der elektrische Impuls die Herzkammern, diese kontrahieren sich und pressen dadurch das Blut zu den einzelnen Organen oder in die Lunge.

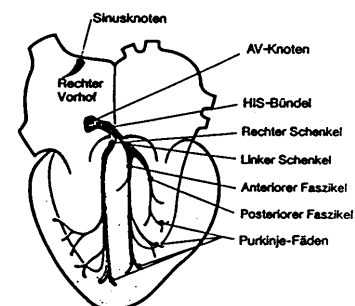


Abb.4,9:  
Erregungsbildung im Herzen

Zusätzlich kann das Gehirn über Nervenbahnen Signale senden, die unser Herz schneller schlagen lassen (wenn wir z.B. aufgeregt oder ängstlich sind).

Der Sinusknoten gibt in Ruhe einen Schlagrhythmus von 60-100 Herzschlägen pro Minute vor, also über 100 000 mal pro Tag! Dabei werden etwa 8000 Liter Blut durch unseren Körper befördert. Bei körperlicher Anstrengung, Streß oder Krankheit können diese Werte allerdings erheblich höher sein.

Versuche mit Hilfe der Abb. 4,8-4,10 nachstehende Fragen zu beantworten.

### Fragen

- Welche Kammer pumpt das Blut in den Körper? In welche Kammer kommt es vom Körper zurück?
  
- Die Herzfrequenz einer Frau wurde während 24 Stunden mehrmals gemessen. Abbildung 4,10 zeigt das Ergebnis.
  1. Welche war die höchste, welche die niedrigste Frequenz?
  2. Wie oft hat dabei das Herz pro Minute geschlagen?
  3. Diskutiere die möglichen Gründe für das Ansteigen der Frequenz
  4. Wie lange dauerte es ungefähr, bis die durchschnittliche Frequenz wieder erreicht war?

(ABB 4.10 in Dipl.arbeit nicht scan-fähig)

Abb. 4,10: Herzfrequenz einer 35jährigen Frau

## Was kann Herzerkrankungen verursachen?

Es gibt viele Gründe für Herzerkrankungen. Einige davon sind:

- Lebensführung, Streß, schlechte Ernährung, Nikotin, usw.
- Vererbung - von Generation zu Generation
- Fehlentwicklungen - während der Entwicklung in der embryonalen Phase bildet sich das Organ aus verschiedensten Gründen nicht richtig aus.

### Frage

Rund 50% der Herzerkrankungen sind auf gesundheitsschädliche Lebensführung zurückzuführen, könnten also durch bewußte Entscheidungen vermieden werden. Die Einrichtung und Erhaltung einer Herzstation in einem Krankenhaus kostet sehr viel Geld und wird durch Sozialabgaben von *uns* finanziert.

Diskutiere in Kleingruppen, ob dieser Aufwand der Gesellschaft zuzumuten ist, wo doch die *Schuld* bei den einzelnen Menschen zu suchen ist?

Meine Meinung dazu:



## 5. Elektrische Phänomene der Muskelzelle

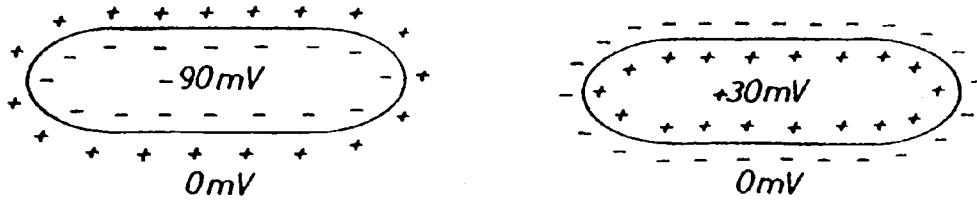
Die Herzmuskelfasern teilen sich funktionell in zwei Bereiche: 1. Arbeitsmuskulatur der Vorhöfe und der Kammern, welche die Hauptmasse des Herzens ausmachen und die mechanische Pumparbeit verrichten. 2. Erregungsbildung und Leitungssystem, die besondere Dienste der Herzerregung erfüllen.

Zum prinzipiellen Verständnis der elektrochemischen Prozesse, die letztlich für die Muskelkontraktion verantwortlich sind, werden vorerst die Vorgänge an einer einzelnen Skelettmuskelfaser betrachtet. Obwohl einige Unterschiede zur Herzmuskulatur bestehen (s. Pkt.5.2), ist diese Vorgangsweise auch didaktisch zu rechtfertigen, da die Kontraktion der Skelettmuskulatur (Gehen, Laufen, Greifen,...) eher an die Erlebnisbereiche der Schüler anknüpft (s. Experimente in den Arbeitsvorlagen)

### 5.1 Spannungsverlauf an Skelettmuskelzellen

Im Ruhezustand besitzt eine Skelettmuskelzelle eine Potentialdifferenz von  $-90\text{ mV}$  zwischen dem Zellinneren und Zelläußeren. Diese Spannung entsteht durch den Aufbau eines Konzentrationsgefälles zwischen Kalium- und Natriumionen im Inneren und Äußeren der Zelle. Da nur die Potentialdifferenz interessiert, kann willkürlich das Zelläußere mit  $0\text{ mV}$  festgelegt werden (Abb. 5,1 links). Dieser stabile Spannungszustand wird als Ruhepotential bezeichnet.

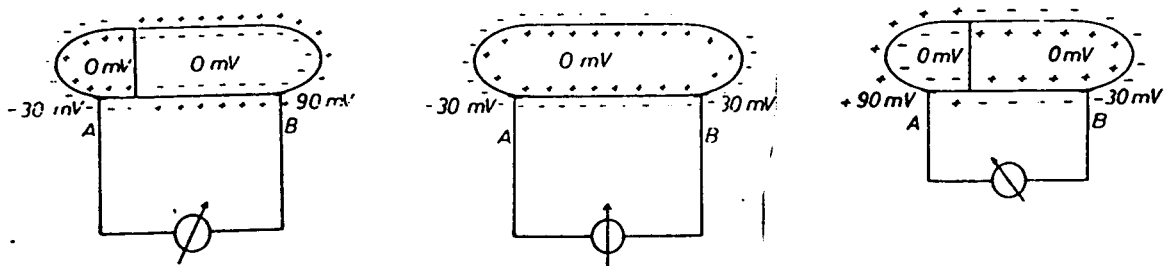
Wirkt jedoch ein mechanischer, chemischer oder elektrischer Reiz auf die Zelle ein, kommt es zu einer Potentialänderung. Diese ist in der Hauptsache durch eine Permeabilitätsänderung der Zellmembran für Kationen und Anionen zu erklären. Die Potentialumkehr (Abb. 5,1 rechts) wird als *Depolarisation* bezeichnet, die Potentialdifferenz beträgt nun  $+30\text{ mV}$ . Dieser Zustand ist allerdings nicht stabil und es erfolgt nach kurzer Zeit die *Repolarisation*, d.h. das Ruhepotential wird wieder aufgebaut.



**Abb. 5,1:** Spannungszustand einer Zelle

Links: Ruhepotential

Rechts: Potentialumkehr nach erfolgtem Reiz



**Abb. 5,2:** De- und Repolarisation einer Zelle

Links: partielle Depolarisation; Mitte: instabiler Zustand nach erfolgter Depolarisation; Rechts: Repolarisation

Die Fortleitung einer elektrischen Erregung erfolgt über Ionenwanderung mit einigen m/s. Wird die Zelle depolarisiert (Abb. 5,2 links), so ist der Bereich um Punkt A früher erregt als um Punkt B. Die dabei auftretende Potentialdifferenz ist mit Hilfe eines Meßinstruments registrierbar.

Nachdem der Vorgang der Depolarisation abgeschlossen ist, ist die Spannungsdifferenz Null (Abb. 5,2 mitte). Nun läuft, da der Zustand nicht stabil ist, die Repolarisation ab (Abb. 5,2 rechts).

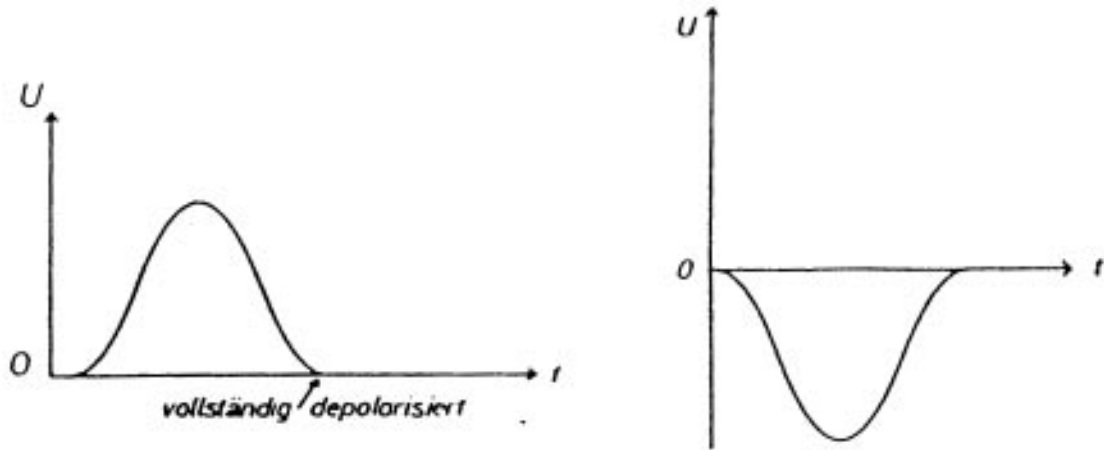
Der Spannungsverlauf kann in einem Spannungs - Zeitdiagramm veranschaulicht werden (Abb. 5,3). Dabei steigt die Spannung von Null auf einen bestimmten Maximalwert an, fällt nach vollständiger Depolarisation wieder auf Null ab, um bei der Repolarisation wieder einen Maximalwert zu erlangen, allerdings mit umgekehrten Vorzeichen.

Da in den meisten Biologieschulbüchern der Spannungsverlauf zwischen Innenelektrode und Außenelektrode behandelt wird, sei hier auch diese Meßanordnung erwähnt (Abb. 5,4 links). Der Vorgang ist dabei natürlich der selbe, allerdings *mißt* man etwas anderes. Aufgrund der veränderten Meßanordnung ergibt sich dabei beim zeitlichen Spannungsverlauf nur mehr eine Kurve (Abb. 5,4 rechts).

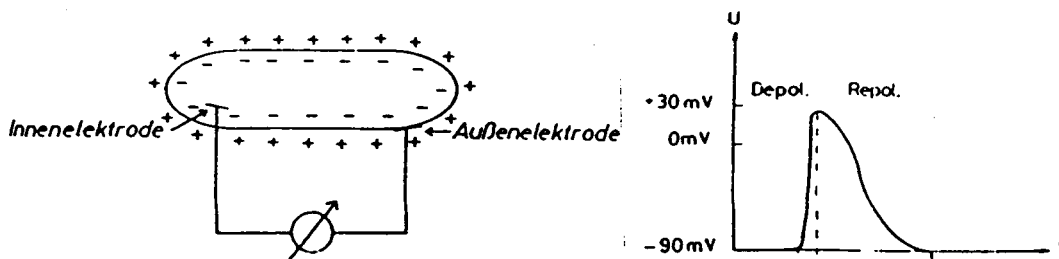
## 5.2 Spannungsverlauf an Herzmuskelzellen

Die Herzmuskelfasern sind wie die Nerven- oder Skelettmuskelfasern erregbare Strukturen, d.h. sie haben ein Ruhepotential (das allerdings nur etwa -70 mV beträgt), sie reagieren auf überschwellige Reizung mit einem Aktionspotential und sie sind in der Lage, die Erregung ohne Verminderung weiterzuleiten.

Die Herzmuskelzellen de- und repolarisieren allerdings autonom, d.h. die rhythmische Pulsation des Herzens wird durch Erregungen ausgelöst, die im Herzen selber entstehen. Daher ist es auch verständlich, daß ein isoliertes Herz in Nährlösung noch stundenlang mit konstanter Frequenz weiterschlagen kann.



**Abb. 5,3:** Spannungs- Zeitdiagramm während der De- bzw. Repolarisation einer Muskelzelle; extrazelluläre Ableitung



**Abb. 5,4:** Spannungsverlauf zwischen Innen- und Außenelektrode

Links: Meßanordnung zu intra- extrazellulärer Ableitung

Rechts: zugehöriger zeitlicher Spannungsverlauf

Außerdem unterscheiden sich Herz- und Skelettmuskelpotentiale in ihrem zeitlichen Verhalten: die zeitliche Dauer des Aktionspotentials ist mit 200 ms rund 100mal so lang wie das eines Skelettmuskels [10].

### **5.2.1 Schwellenreiz, Refraktärzeit**

Abb. 5,5 zeigt die Versuchsanordnung zur Messung des Aktionspotentials; Ableitung an der Innen- und Außenseite einer Zelle.

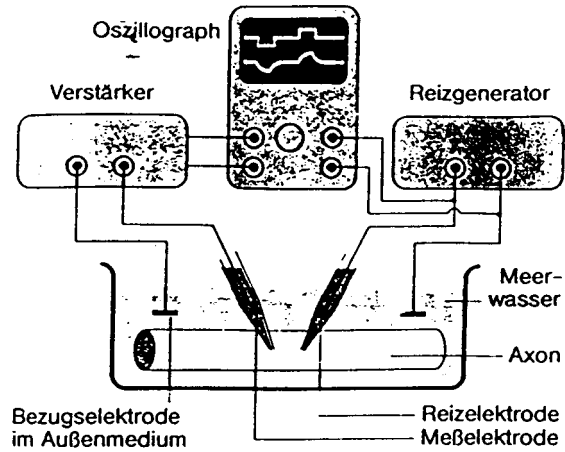
Je höher die angelegte Spannung, desto stärker ändert sich das Membranpotential (Abb. 5,6). Die Reizspannung erniedrigt dabei die Zellspannung bis zu einem bestimmten Schwellenwert. Nur dann, wenn der Reiz das Membranpotential unter den Schwellenwert erniedrigt, entsteht ein Aktionspotential (d.h. plötzliche Spannungsänderung aufgrund einer kurzzeitigen Ladungsumkehr an der Zellmembran).

### **5.2.2 Alles - oder - nichts - Gesetz**

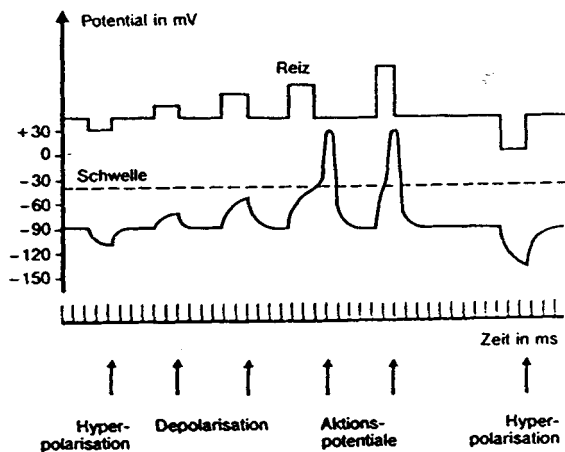
Erst wenn der Reiz den Schwellenreizwert erreicht hat, erfolgt eine Reizantwort des gesamten Herzmuskels. Jetzt kann der Reiz beliebig gesteigert werden, der Reizerfolg bleibt in seiner Stärke der gleiche.

Eine Skelettmuskelreaktion ist in ihrer Stärke steuerbar - je stärker der Reiz, umso stärker die Kontraktion. Diese Verschiedenheit ist durch den anatomischen Aufbau bedingt.

Die Skelettmuskeln sind elektrisch durch Bindegewebe voneinander getrennt, die Herzmuskelfaser kann dagegen wegen ihrem Verzweigungssystem einen Reiz direkt auf die nächste übertragen. Bei Polarisation einer Faser werden daher alle depolarisiert.



**Abb. 5,5:** Versuchsanordnung zur gleichzeitigen intrazellulären Reizung und Ableitung einer Zelle; ein Zweistrahloszillograph zeichnet mit dem oberen Strahl die Reizspannung und mit dem unteren Strahl den Verlauf des Membranpotentials auf



**Abb. 5,6:** Reizung einer Herzmuskelzelle mit steigender Reizspannung (obere Linie)

Die untere Linie zeigt das Membranpotential; nur ab dem Schwellenwert entsteht ein Aktionspotential. Die Amplitude der Aktionspotentiale ändert sich auch bei weiterer Erhöhung der Reizspannung nicht.

Ein weiterer Unterschied zwischen Skelett- und Herzmuskelfasern besteht in ihrer Fähigkeit zur Dauerkontraktion (Tetanie). Erstere können dauerkontrahieren, weil die elektrische Refraktärzeit (1-2 ms) sehr viel geringer ist, als die mechanische Refraktärzeit. Dagegen ist der Herzmuskel erst kurz vor Beendigung einer mechanischen Kontraktion wieder erregbar und daher nicht tetanisierbar.

### 5.2.3 Nernstsche Gleichung

Eine permeable Membran trennt zwei elektrisch neutrale Lösungen mit verschiedenen z.B. Kaliumionenkonzentrationen  $c_1$  und  $c_2$ , mit  $c_2 > c_1$ . Um zu einem Gleichgewichtszustand zu gelangen, werden folglich Kaliumionen von  $c_2$  nach  $c_1$  wandern (Osmose in Richtung geringerer Konzentration).

Jedes abgewanderte Kaliumion bedeutet aber eine negative Aufladung der Lösung  $c_2$  und gleichzeitig eine positive Aufladung der Lösung  $c_1$ . Es baut sich folglich zwischen  $c_1$  und  $c_2$  eine Spannung  $U$  auf, die der Ionenwanderung letztlich ein Ende setzt. Es tritt ein Gleichgewichtszustand ein, wenn die osmotische Arbeit zum Transport eines Mols Kaliumionen gleich der elektrischen Arbeit ist, um ein Mol Kaliumionen gegen die Spannung  $U$  zu bewegen. Für diesen Fall gilt:

$$U = - \frac{k \cdot T}{Z \cdot e} \cdot \ln \frac{c_1}{c_2}$$

Dabei bedeuten:

$k$ ...Boltzmann-Konstante =  $1,38 \cdot 10^{-23}$  J/K

$T$ ...Temperatur  $37^\circ = 310$  K

$Z \cdot e$ ..Ladung eines Ions  $e = 1,6022 \cdot 10^{-19}$  As

Mit Hilfe der obigen Nernstschen Gleichung ist es möglich, die Größe des Ruhepotentials einer lebenden Zelle in erster Näherung zu berechnen - sie gilt aber auch ganz allgemein für nichtbiologische Systeme gleicher Anordnung.

Im Realfall sind  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$  Ionen beteiligt, für die sich folgende Werte (gerundet) ergeben [19]:

Ionen	$c_1/c_2$	U (in mV)
[ $\text{Na}^+$ ]	9,7	-60
[ $\text{Cl}^-$ ]	13,9	-70
[ $\text{K}^+$ ]	0,03	+90

#### 5.2.4 Ionale Mechanismen

In einer Zelle werden durch die Zellmembran natürlich verschiedenste Ionen voneinander getrennt, jedoch nur Natrium-, Kalium- und Chlorionen spielen für das Zustandekommen des Membranpotentials eine Rolle.

Die Membranen von Nervenzellen verhalten sich wie kationen-permeable Membranen, die lediglich  $\text{K}^+$ -Ionen völlig ungehindert durchlassen. Innerhalb der Zelle befinden sich viele  $\text{K}^+$ -Ionen und wenige  $\text{Na}^+$ -Ionen, im Außenraum liegen die Verhältnisse genau umgekehrt.

Aus den vorher beschriebenen Gründen kommt es daher zu einem Aufbau des Ruhepotentials von 70 bis 90 mV, innen negativ und außen positiv.

Beim Zustandekommen des Aktionspotentials wirken Membranpotentialänderungen, Veränderungen der Ionenleitfähigkeit und Ionenströme in komplizierten kausalen Verknüpfungen zusammen.

Tritt eine Depolarisation an einer Zelle auf (Verminderung der positiven Ladungen im Außenraum), so vergrößert sich hierdurch die Natriumpermeabilität der Zellmembran (bis auf das 100fache des Ruhewertes). Natrium-Ionen können durch bis dahin verschlossenen Poren ins Innere der Zelle gelangen. Der Einstrom der  $\text{Na}^+$ -Ionen bedeutet dabei, daß sich die Spannung von -90 mV zu positiveren Werten verschiebt, und zwar bis zu 30 mV.



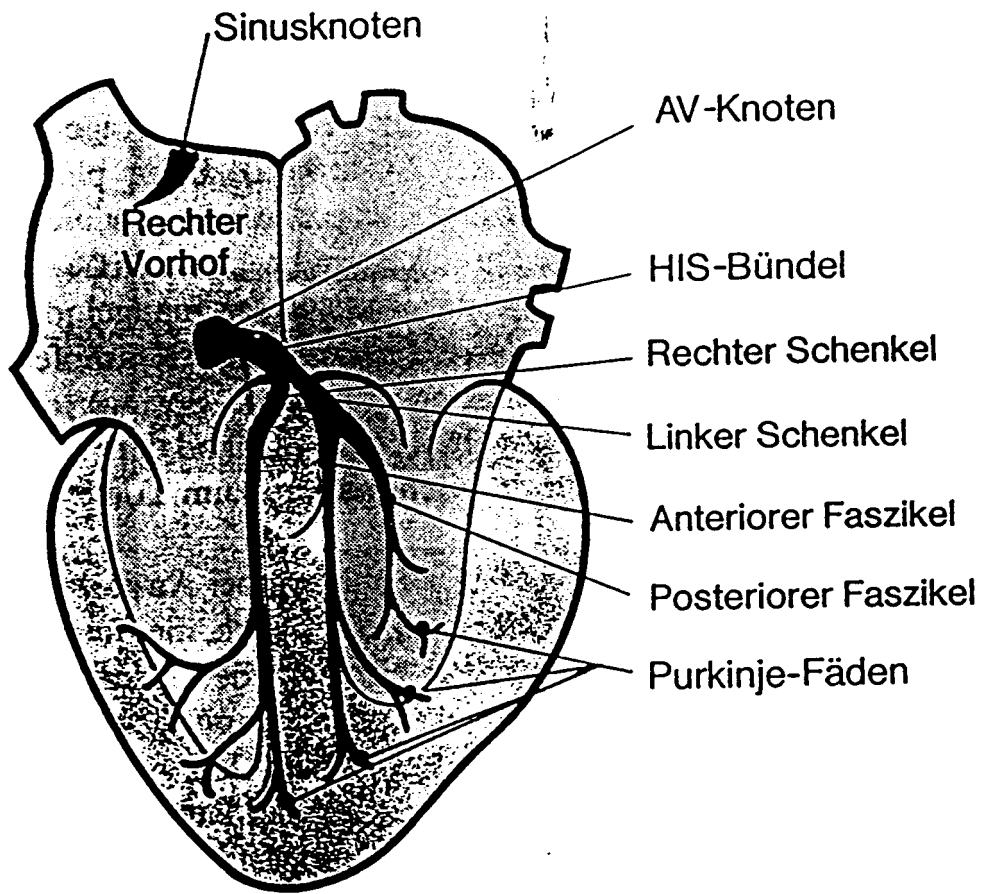
Zeitlich verzögert tritt auch eine Erhöhung der  $K^+$ -Permeabilität an der Zellmembran auf, bei gleichzeitiger Verringerung der Durchlässigkeit für  $Na^+$ -Ionen. Auf der Aktionspotentialspitze halten sich Ein- und Ausstrom gerade die Waage. Die Außenseite der Membran ist nun negativ, die Innenseite positiv, eine völlige Umladung hat stattgefunden. In der Repolarisationsphase strömen  $K^+$ -Ionen weiterhin aus und der Einstrom von  $Na^+$ -Ionen wird weiter verringert. Erst wenn das Ruhepotential von -90 mV wieder erreicht ist, kann die Membran erneut depolarisiert werden.

Interessant ist auch die Frage, wie und wann das ausgeströmte Kalium wieder in die Zelle hineintransportiert wird, bzw. wie das eingeströmte Natrium wieder aus der Zelle herausgeschafft wird. Dieser Vorgang geschieht in der Ruhephase der Muskel unter Energieverbrauch (*Ionenpumpe*).

### 5.3 Reizleitungssystem des Herzens

Normalerweise geht der Anstoß zu einem Herzschlag vom *Sinusknoten* aus (Abb. 5,7). Das ist jene Zelle, die den niedrigsten Schwellenwert, die höchste Eigenfrequenz und die schnellste Vorpolarisation besitzt. Der Sinusknoten wird daher auch als natürlicher Schrittmacher des Herzens bezeichnet, weil er durch seine Frequenz von 70 Impulsen/min. die anderen Erregungszentren des Herzens überspielt. Der Sinusknoten ist innerviert, die übrigen Zellen des Reizleitungssystems nur in sehr geringem Maße.

Vom Sinusknoten breitet sich der elektrische Reiz über die Vorhöfe bis hin zum Atrioventricular-Knoten (AV-Knoten) aus. Der AV-Knoten besitzt einen geringeren Eigenrhythmus von 40-50 Impulsen pro Minute, d.h. er wird vom Reiz des Sinusknoten depolarisiert, bevor er sein eigenes Aktionspotential aufbauen kann.



**Abb. 5,7:** Frontalschnitt des Herzens

Vom Sinusknoten aus breitet sich die elektrische Erregung entlang der Erregungsleitungen über das Herz aus

Ist die Überleitung Sinus - AV - Knoten aus irgendeinem Grund gestört, so folgt das Herz dem Rhythmus von 40-50 Schlägen pro Minute, was bestenfalls für eine Blutversorgung bei Bettruhe ausreicht. Elektronische Schrittmacher werden implantiert, um als Ersatzrhythmus wieder Leistungsfähigkeit zu garantieren.

Das anschließende His-Bündel, die Schenkel und ihre Endaufzweigung und die Purkinje-Fäden leiten die Erregung mit ca. 2 m/s weiter [15]. Das His-Bündel besitzt eine Eigenfrequenz von 20-30 pro Minute; je weiter man sich also vom Sinusknoten in Richtung der Reizausbreitung entfernt, desto geringer wird die Eigenfrequenz.

## 5.4 Das Herz als Dipol

An dem gesamten Herzen soll zu einem bestimmten Zeitpunkt ein Depolarisationszustand wie in Abb. 5,8 herrschen. Ein elektrisches System mit einer derartigen Ladungsverteilung nennt man *Dipol*.

Da bei jeglichen Messungen letzten Endes die durch das Feld entstehende Potentialdifferenz gemessen wird, stellt sich die Frage nach der Größe und dem Aussehen des Potentials  $\Phi$ , das ein derartiges Dipol in einem beliebigen Punkt P erzeugt. Durch mathematische Ableitung [z.B. 11, 6], bei der vorausgesetzt wird, daß der Abstand r dieses Punktes P vom Dipolmittelpunkt groß gegenüber der Länge d des Dipols ist, kann folgendes gezeigt werden:

- Das Potential ist proportional dem elektrischen Dipolmoment M, das definiert ist als:

$$M = q \cdot d$$

q = Betrag der entgegengesetzt gleich großen Ladungen  
des Dipols

d = Abstand der Ladungen voneinander

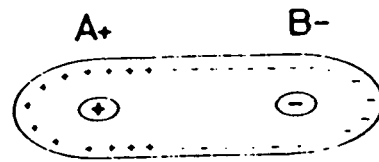


Abb. 5,8: Darstellung einer teilweise depolarisierten Zelle als Dipol

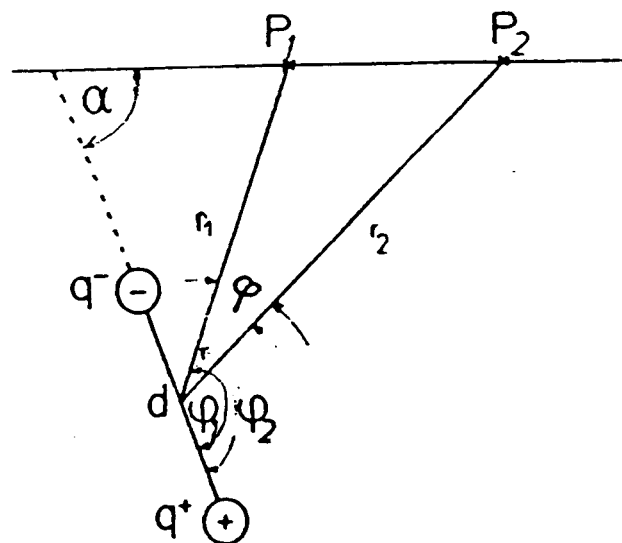


Abb. 5,9: Winkelabhängigkeit der abgeleiteten Spannung

- Die Potentiale im  $P_1$  und  $P_2$  sind proportional dem Kosinus der Winkel  $\varphi_1$  bzw.  $\varphi_2$  (Abb. 5.9)
- Das Potential ist umgekehrt proportional dem Abstandsquadrat

Somit ergibt sich für einen speziellen Punkt  $P_1$ :

$$\varphi_1 = M \cdot \frac{\cos \varphi_1}{r_1^2}$$

Analog für  $P_2$ :

$$\varphi_2 = M \cdot \frac{\cos \varphi_2}{r_2^2}$$

Die Differenz beider Potentiale ergibt die Spannung  $U$ , die zwischen beiden Punkten im Feld des Dipols herrscht:

$$U = \varphi_1 - \varphi_2$$

Bei der Elektrokardiogramm Messung interessieren allerdings weniger die beiden Winkel, sondern der Winkel, den die Dipolachse mit der Verbindungsachse der beiden Ableitungspunkte  $P_1$  und  $P_2$  bildet. Wie aus Abb. 5,9 ersichtlich, ergibt sich für die Abhängigkeit von  $U$  folgende Beziehung:

$$U = k_1 \cdot U_0 \cdot \cos \alpha \cdot \cos \varphi/2$$

Von der Körperoberfläche aus gesehen ist das Zellstück der Herzzelle so klein, daß man es als punktförmig annehmen kann. Das Herz soll sich weiters in der Mitte einer homogenen Kugel befinden, auf deren Oberfläche die Ableitungspunkte  $P$  angebracht sind.

In der Größe  $k_1$  stecken alle konstanten Größen des Dipols, sowie die  $r$ -Abhängigkeit der Ableitpunkte; diese ist bei unserer vereinfachten Annahme einer Kugel natürlich für alle Punkte gleich.

Wird die Kugel in der Mitte auseinandergeschnitten und auf der Schnittfläche die 3 Ableitpunkte des EKG so gelegt, daß ein gleichseitiges Dreieck entsteht, dann ist aus Symmetriegründen der Winkel  $\varphi$  ebenfalls konstant.  $k_1 \cdot \cos \varphi/2$  kann also einer neuen Konstante  $k_2$  gesetzt werden und es ergibt sich letztlich:

$$U = k_2 \cdot U_0 \cdot \cos \alpha$$

Die Spannung des Dipols ist in den Ableitpunkten proportional dem Kosinus  $\alpha$  mal der Spannung  $U_0$ , die maximal zwischen den beiden Ladungen herrscht.

Bei der Aufnahme des EKG wird nicht das Potential einer Zelle erfaßt, sondern die elektrische Aktivität des Herzens, die sich aus der Summe der Potentiale der einzelnen Herzzellen ergibt.

Bei den bisherigen Überlegungen wurde davon ausgegangen, daß der Dipol einen festen Abstand und feste Ladungen  $q+$  und  $q-$  besitzt. Wie schon in Pkt. 5.1 dargestellt, trifft diese Annahme nicht zu. Vielmehr ändert sich der Abstand und die Ladungen ständig bedingt durch die beschriebenen De-Repolarisationsvorgänge. Das Herz stellt daher einen schwingenden Dipol dar, dessen elektrisches Feld sich ständig ändert. Bei der Messung wird demnach die zeitliche veränderliche Spannung  $U$  aufgenommen.

## 5.5 Das Elektrokardiogramm

Das Elektrokardiogramm stellt die Aufzeichnung solcher Potentialdifferenzen in Abhängigkeit der Zeit dar. Es ist damit Ausdruck der Herzerregung - nicht der Kontraktion!

### 5.5.1 Form des EKG und Terminologie

Bei der Ausbreitung und Rückbildung der Erregung des Herzens entsteht ein elektrisches Feld, das bis an die Körperoberfläche ausgreift. Die zeitlichen Veränderungen der Größe und Richtung dieses Feldes spiegelt sich in den Veränderungen von Potentialdifferenzen wieder, die zwischen verschiedenen Stellen der Körperoberfläche gemessen werden können und in der Medizin als *Ableitungen* bezeichnet werden.

Abb. 5,10 zeigt eine solche Ableitung zwischen dem linken Bein und dem rechten Arm. Die ersichtlichen Zacken und Wellen (Spannungshöhen) werden in der Medizin mit Buchstaben von P bis T bezeichnet.

- *P-Welle*: Der erste Spannungsimpuls entsteht bei der Reizausbreitung in den Vorhöfen. Nachdem die gesamte Depolarisation der Vorhöfe beendet ist, ist die gemessene Spannung wiederum Null.
- *QRS-Komplex*: Die QRS-Gruppe ist Ausdruck der Erregungsausbreitung über beide Kammern, entspricht also der Depolarisation der Kammern.
- *T-Welle*: Die T Welle ist Ausdruck der Erregungsrückbildung, zeigt also den zeitlichen Spannungsverlauf bei der Repolarisation der Kammern an. Nach dem Ende einer T- Welle ist eine elektrische Herzaktion beendet und es beginnt nach einer bestimmten Pause die nächste. Diese elektrischen Phänomene sind Ursache für die mechanische Aktion des Herzens.

### 5.5.2 Entstehung des EKG

Jene Grundlagen, die für das Entstehen der EKG Aufzeichnung verantwortlich sind, sollen hier noch einmal zusammengefaßt werden:

- Das elektrische Feld des erregten Herzens resultiert aus der Überlagerung vieler elementarer Feldkomponenten, die von den Einzelfasern ausgehen.
- Jede erregte Herzmuskelfaser wirkt als Dipol und bestimmt die Richtung und Stärke eines elementaren Dipolvektors.
- Zahlreiche Einzeldipolvektoren summieren sich in jedem Zeitpunkt zu einem Summenvektor (vergl. die Bildung der Resultanten im Parallelogramm der Kräfte). Ein Großteil der Vektoren werden sich in ihrer Wirkung nach außen dabei auf- heben (zeitweise bis zu 90%).

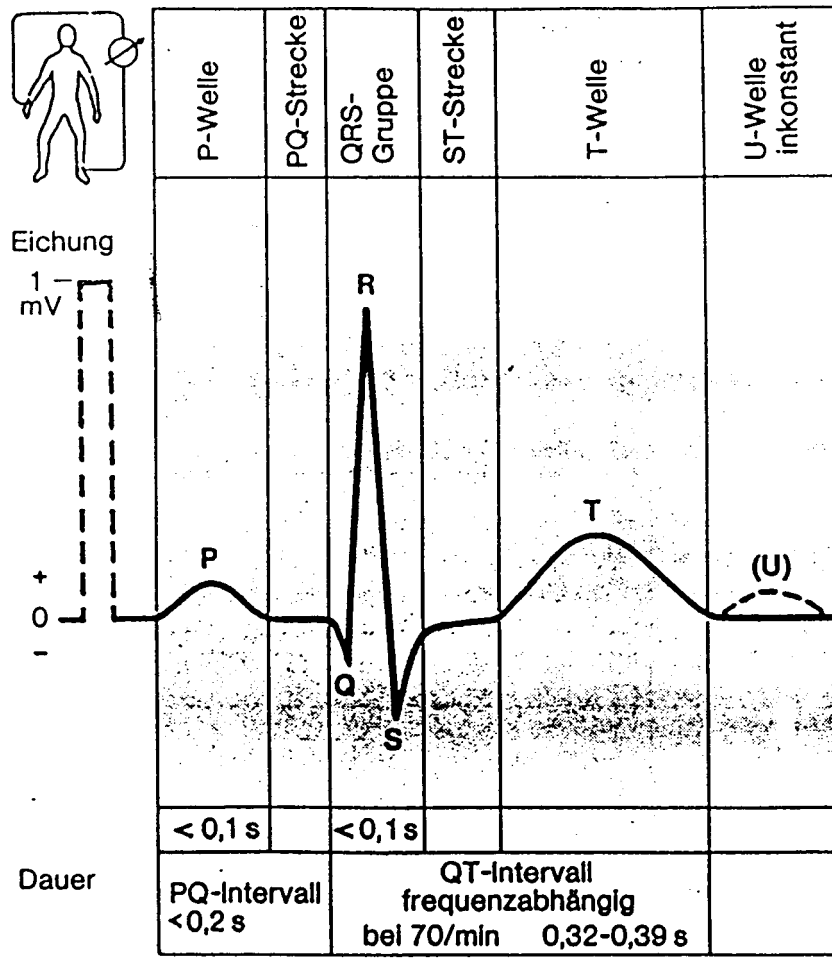


Abb. 5,10: Normalform des EKG bei Ableitung von der Körperoberfläche (rechter Arm und linkes Bein) in Richtung der Herzlängsachse



- Die Richtung im Herzen, in die während des Aktionspotentials der maximale elektrische Vektor zeigt, wird elektrische Herzachse genannt.
- Die Größe der quellenfernen meßbaren Spannung wird von der Stärke des Summenvektors sowie von der Abgriffsrichtung im Verhältnis zur Vektorrichtung (Richtung der Herzachse) bestimmt.

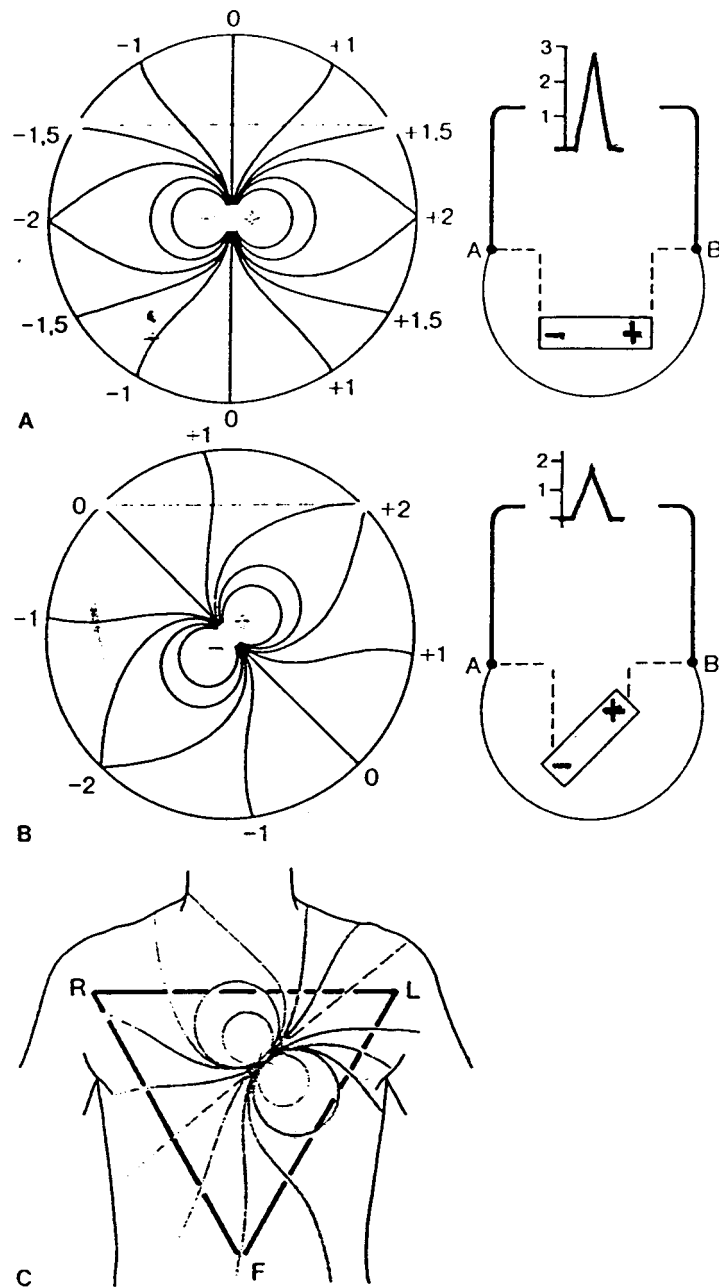
Abb. 5,11 zeigt zum besseren Verständnis das elektrische Feld eines Dipols, das von einem homogen leitenden Medium umgeben ist. Dabei liegen alle Punkte mit demselben Potential auf Isopotentiallinien.

Vergleicht man die untereinanderliegenden Bilder, wird ersichtlich, daß die Potentialdifferenz zwischen den Punkten A und B vom Verhältnis der Ableitrichtung (d.h. Verbindungslinie zwischen A und B) zur Dipolrichtung abhängt.

Formal verhält sich die gemessene Spannung also so, als ob der Summenvektor auf die Ableitrichtung projiziert wird. Wie auch aus Formel in Pkt. 5.4 ersichtlich, ist die Spannung am größten, wenn beide Richtungen übereinstimmen und gleich Null, wenn die Richtung des Dipolvektors normal zur Richtung der Ableitung steht.

Trotz der bisher verwendeten Einschränkungen und Vereinfachungen lassen sich die Vorstellungen im Prinzip recht gut auf das menschliche Herz übertragen - auf jeden Fall ist die verwendete Theorie für den Schulunterricht ausreichend.

Es muß allerdings darauf hingewiesen werden, daß der Körper kein elektrisch homogenes Medium darstellt und das Herz auch nicht ideal im Zentrum eines kugelförmigen Leiters liegt. Das elektrische Feld des Herzens wird also nur verzerrt an die Körperoberfläche gelangen.



**Abb. 5,11:** Ableitung im elektrischen Feld eines Dipols bei kreisförmig begrenztem homogenen Medium. Potential in relativen Einheiten am Rand angegeben. Drehung des Dipols (B) führt zur Abnahme der gemessenen Spannung von +3 auf +2.

Das vom Dipol Herz erzeugte Feld zu einem bestimmten Zeitpunkt (C).

### 5.5.3 Ableitungsformen

In der medizinischen Praxis sind heute folgende Ableitungsformen gebräuchlich [10], die zunächst aufgezählt und später erläutert werden:

#### *Extremitätenableitungen*

bipolar: Standardableitung nach Einthoven

unipolar: Ableitung nach Goldberger

#### *Brustwandableitungen*

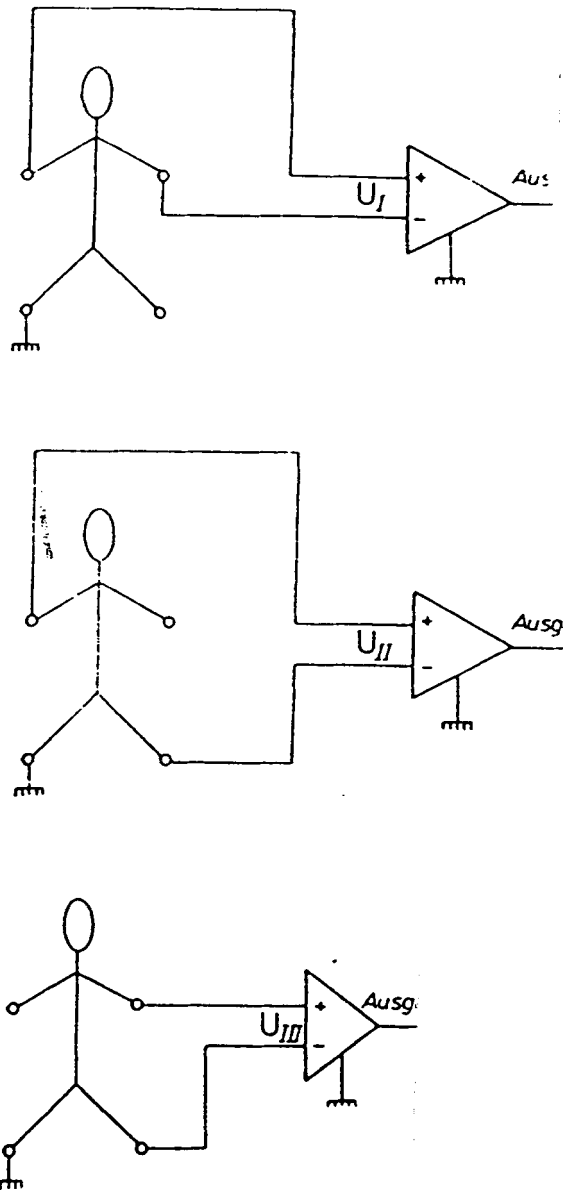
bipolar: kleines Brustwanddreieck nach Nehb

unipolar: Ableitung nach Wilson

Da die Begriffe unipolar und bipolar in der Physik nicht in dem hier verwendeten Sinn gebräuchlich sind, sollen sie kurz erläutert werden:

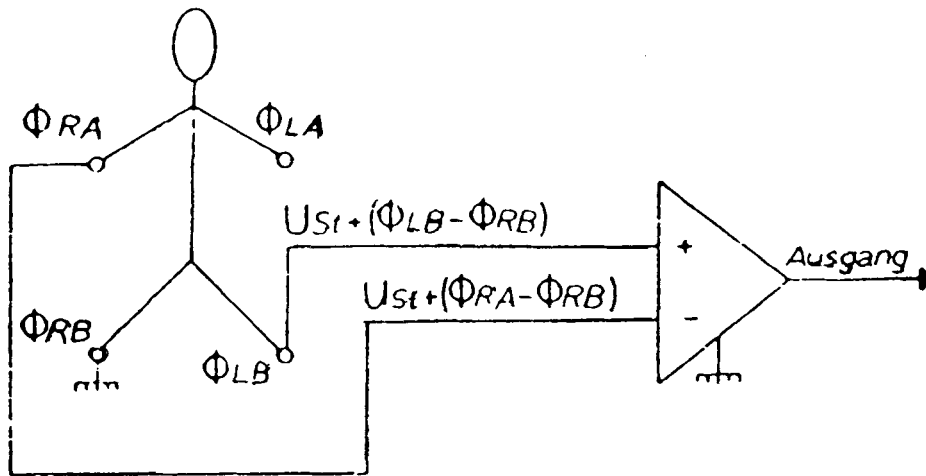
- Unipolare Ableitung: Definitionsgemäß besteht eine elektrische Spannung zwischen zwei Punkten. Zur Messung der Potentialdifferenz benötigt man daher zwei Anschlüsse, wobei einer willkürlich Null (Erde) gesetzt wird und der andere die Spannung gegenüber der Erdleitung mißt. Jede Spannungsmessung ist daher zunächst eine unipolare Messung
- Bipolare Ableitung: Will man nach diesem Prinzip eine II Ableitung nach Einthoven (mißt den zeitlichen Spannungsverlauf zwischen dem linken Bein und dem rechten Arm, s. Abb. 5,12 oben) aufnehmen, so könnte man den rechten Arm an Erde und das linke Bein an den Eingang eines Verstärkers legen und so die gewünschte Potentialdifferenz  $U_{II}$  messen. Leider wird in den EKG Ableitungskabeln oft eine Störspannung  $U_{st}$  induziert, die oft größer als die eigentliche EKG Signalspannung ist. Zur Eliminierung dieser Störspannung wird ein Differenzverstärker benutzt und zur Ableitung eine Erdelektrode und zwei (daher die Bezeichnung bipolar) Meßelektroden angeschlossen.

Abb. 5,14 zeigt die II Standardableitung mit Hilfe eines Differenzverstärkers, wobei am Minuseingang die gesamte Spannung  $U_{st} + (\phi_{RA} - \phi_{RB})$  und am Plusseingang entsprechend  $U_{st} + (\phi_{LB} - \phi_{RB})$  liegt.

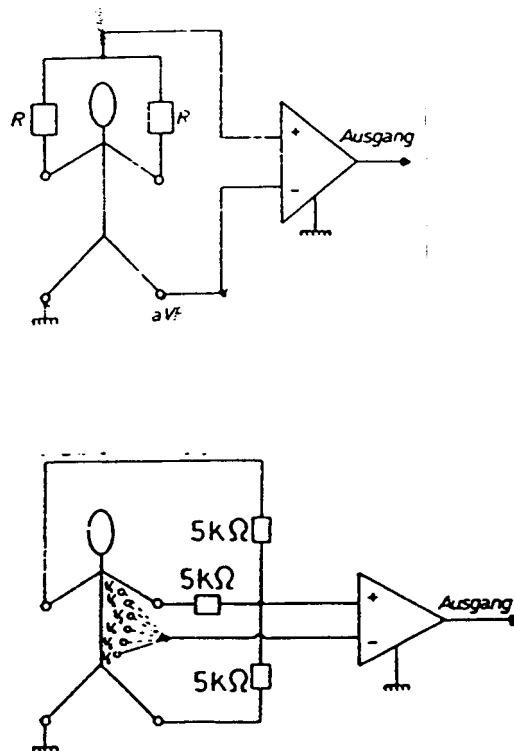


**Abb. 5,12:** Die drei Einthovenschen Ableitungen

Oben: I. Ableitung; Mitte: II. Ableitung; Unten: III. Ableitung



**Abb. 5,13:** II. Standardableitung mittels Differenzverstärkers zur Eliminierung der induzierten Störspannungen



**Abb. 5,14:** Standardableitungen

Oben: EKG - Ableitung nach Goldberger

Unten: EKG - Ableitung nach Wilson

Die am Minuseingang liegende Spannung erscheint wie die am Pluseingang um den Faktor  $k$  verstärkt, allerdings invertiert.

Wie man sich durch einfache Rechnung überzeugen kann, wurde durch diese Meßmethode die induzierte Störspannung eliminiert ohne Beeinträchtigung des Meßsignals und es ergibt sich für die Ausgangsspannung:

$$U_A = k \cdot (\phi_{LB} - \phi_{RA})$$

Das Ergebnis entspricht also dem der direkt unipolaren Ableitung, allerdings ohne Störfaktoren.

Denkbar wäre auch, die Leitungen abzuschirmen, indem man den gesamten Körper in einen Faradayschen Käfig bringt. Der Aufwand dafür ist aber wesentlich größer und hat sich daher in der Praxis nicht durchgesetzt.

Der Übersicht halber erfolgt eine kurze Beschreibung der häufigst verwendeten Ableitungsformen.

### 5.5.3.1 Ableitung nach Einthoven

Man unterscheidet üblicherweise drei Projektionen als Standardableitung I,II,III, wobei in modernen EKG-Schreibern die Ableitungskabel intern so geschaltet sind, daß alle drei gleichzeitig aufgenommen werden können.

Die I. Ableitung mißt den zeitlichen Spannungsverlauf zwischen dem linken und rechten Arm (Abb. 5,12 mitte). Die II. Ableitung mißt den zeitlichen Spannungsverlauf zwischen dem linken Bein und dem rechten Arm (Abb. 5,12 oben). Die III. Ableitung mißt den zeitlichen Spannungsverlauf zwischen dem linken Bein und dem linken Arm (Abb. 5,12 unten).

Da sich das elektrische Feld des Herzens fast ausschließlich im Brustraum befindet, sind Arme und Beine elektrisch gesehen wie verlängerte Elektroden. Wegen der  $1/r^2$  Abhängigkeit besteht keine große Differenz zwischen der Messung an den Extremitäten Ansätzen oder Enden.

### 5.5.3.2 Ableitung nach Wilson

Bei dieser Ableitung werden drei Extremitätenkabeln zusammengeschlossen und bilden den einen Pol der Ableitung (Abb. 5,14 unten). Der zweite Pol besteht aus einer Saugelektrode, die auf dem Brustraum angebracht wird. Gemessen wird daher die Potentialdifferenz der jeweiligen Brustwandelektroden und der zusammengeschal-

tenen Elektrode (mehrkanalige Schreiber können alle sechs Ableitungen gleichzeitig aufnehmen). Die Erdelektrode befindet sich wieder am rechten Bein.

### 5.5.3.3 Ableitung nach Goldberger

Hier werden die Ableitkabel von jeweils zwei Extremitäten über Widerstände verbunden und bilden einen Pol gegenüber dem noch freien Kabel der dritten Extremität als zweiten Pol (Abb. 5,14 oben).

In heute verwendeten EKG Geräten werden die oben beschriebenen Ableitungen gleichzeitig aufgenommen, da zur medizinischen Diagnostik die Auswertung aller Aufzeichnungen notwendig ist.

### 5.5.4 Diagnostische Aussagen

Das EKG spielt in der Diagnostik eine wichtige Rolle, um Veränderungen der Herzerregung als Ursache oder Folge von Störungen der Herztätigkeit aufzuzeigen.

Folgende Informationen können bei den Routineableitungen erhalten werden [10]:

- *Frequenz:* Differenzierung zwischen normaler, überhöhter oder erniedrigter Frequenz.
- *Ursprung der Erregung:* Entscheidung, ob die Erregung im Sinus-Knoten oder im AV-Knoten entsteht.
- *Rhythmusstörungen:* Unterscheidung nach Art und Ursprung (Flattern und Flimmern, Extrasystolen).
- *Leitungsstörungen:* Leitungsverzögerungen oder Leitungsblock.
- *Herzlage:* Hinweis auf die anatomische Herzlage.
- *Extrakardiale Einflüsse:* Anhaltspunkte für Stoffwechselstörungen, hormonelle und vegetative Störungen, Vergiftungen und Arzneimitteln.
- *Primär kardiale Störung:* Sauerstoffmangelversorgung des Herzens, Entzündungen und angeborene bzw. erworbene Herzfehler.
- *Herzinfarkt:* Anhaltspunkte über Lokalisation, Ausdehnung und Verlauf.

In der Regel sind die EKG- Ableitungen nur Hinweise auf pathologische Prozesse, wobei sich zwingende Rückschlüsse nur im Zusammenhang mit dem allgemeinen klinischen Bild ergeben.

## 6. Anwendung im Unterricht

### 6.1 Grobplanung

Ausgehend von einem Diffusionsexperiment, bei dem das Zustandekommen des Ruhepotentials erläutert wird hin zu einem Schülerarbeitsblatt zum Entstehen des Aktionspotentials, sollen dem Schüler schrittweise die bioelektrischen Vorgänge am Herzen veranschaulicht werden.

Wie schon in Pkt. 4.1 ausführlicher beschrieben, ist dieser *Stoff* biologisch bereits in der 6. Klasse behandelt worden, *sollte* also Wiederholung bzw. Vertiefung darstellen.

Um dem Lehrer und Schüler eine zeitaufwendige Zusammenstellung der wichtigsten Phänomene zu ersparen, sind im folgenden Punkt 6.2 Arbeitsvorschläge zusammengefaßt. Aus diesem Grund unterbleiben an dieser Stelle auch vertiefende Verweise auf andere Textstellen, die aber bei Interesse leicht anhand des Inhaltsverzeichnisses nachgeschlagen werden können.

Basierend auf diesen Experimenten, läßt sich die medizinische Aufzeichnung der Herzerregung (EKG) veranschaulichen, wobei es didaktisch ratsam erscheint, zuerst die Aufzeichnung des Elektromyogramms (EMG) voranzustellen, da die Muskelanspannung z.B. des Bizeps dem Schüler vertrauter und weniger abstrakt ist. Das *Durchschauen* heutiger medizinischer Untersuchungsmethoden steht aber hier im Mittelpunkt.

### 6.2 Arbeitsvorlagen zu Ruhepotential und EKG

Die folgenden Unterrichtsvorschläge beinhalten Schülerinformationsblätter, die als Kopiervorlagen gedacht sind. Getrennt davon auch zusätzliche Lehrerinformationen, die Versuchserklärungen und vertiefendes Wissen enthalten.

Auf die, zu dieser Arbeit konformen Numerierung, ist bewußt verzichtet worden.



# Die Nervenzelle als Spannungsquelle

## Inhalt:

Physikalische Grundlagen biologischer Vorgänge an einer Nervenzelle, Diffusionsspannung und Osmose

## Zielsetzung:

- Fächerübergreifende Denkweisen animieren
- Experimentelle Ergänzung und Wiederholung biologischen und chemischen Wissens
- Praktische Fähigkeiten im Umgang mit Experimenten entwickeln  
(Versuchsaufbau, Aufnahme und Auswertung von Meßergebnissen)
- Vertiefung der Begriffe der elektrischen Spannung und der Einstellung von Gleichgewichten

## Material:

2 Glaskammern; KCl Lösungen unterschiedlicher Konzentration; 2 Elektroden; Verbindungskabel und Meßverstärker mit mV Skala; Kalle Haushaltsfolie; Klemmbefestigung

## Grundlegendes über Nervenzellen

Die Grundlage aller Sinneswahrnehmungen und darauffolgender Reaktionen bildet das System unserer Nervenzellen, in denen elektrische Spannungen erzeugt und Ströme weitergeleitet werden.

Die Empfangszellen der Sinnesorgane liefern analoge Signale, die in der eigentlichen Nervenzelle digitalisiert werden. Die Information steckt dann in der zeitlichen Abfolge von kurzzeitigen Stromstößen.

## Wieso Spannungsquelle?

Bringt man zwei Lösungen unterschiedlicher Konzentrationen zusammen, so erfolgt auf Grund des kinetischen Energiegehalts und der Brownschen Bewegung eine Teilchenwanderung (Moleküle, Ionen) von der höheren Konzentration zur niederen. Die Stoffwanderung ist mit dem Konzentrationsausgleich beendet.

Trennt jedoch eine halbdurchlässige Membran unterschiedliche Konzentrationen, so diffundieren nur jene Teilchen, deren Radien kleiner als die Poren der Membran sind.

Wandern Ionen auf Grund der unterschiedlichen Konzentrationen durch die Membran, so entsteht dadurch eine Potentialdifferenz zu beiden Seiten der Membran. Das sich aufbauende elektrische Feld setzt der Diffusion schließlich ein Ende; das System befindet sich im Gleichgewicht.

Allgemein kann das resultierende elektrische Potential aus der Nernstschen Gleichung berechnet werden:

$$U = R \cdot T \cdot F^{-1} \cdot \ln([c_1]/[c_2])$$

wobei F die Faraday-Konstante, R die universale Gaskonstante und  $c_2$  und  $c_1$  die jeweiligen Konzentrationen bedeuten.

Unter Verwendung dekadischer Logarithmen und bei einer Temperatur von 20°C (293 K) ergibt sich:

$$U = 0,058 \cdot \log([c_2]/[c_1]) \text{ Volt.}$$

Ist  $[c_1] = 0,1 \text{ mol/l}$  und  $[c_2] = 1 \text{ mol/l}$ , beträgt in diesem Fall  $U = 0,058 \text{ V}$ ; verändert man  $[c_1]$  auf  $0,01 \text{ mol/l}$ , so beträgt  $U = 2 \cdot 0,058 \text{ V}$ , also  $116 \text{ mV}$ .

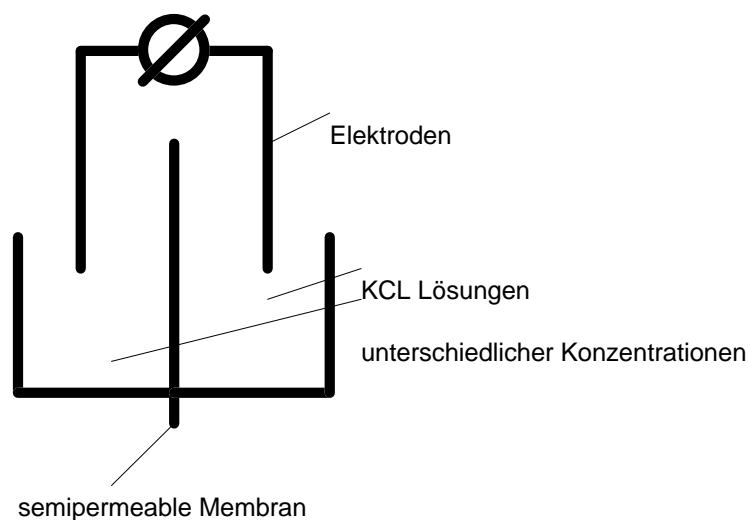
## Versuchsdurchführung

Da die vorhandenen Materialien von Schule zu Schule verschieden sind, soll hier nur die Idee bzw. der schematische Aufbau wiedergegeben werden. Der Versuchsaufbau ist dem Artikel "Erregungsleitung in Nervenfasern-Modell zur Ruhespannung" von B. Wolf und A. Burger in MNU 33 (1980)/2 entnommen. Es sei angemerkt, daß gleiche Autoren in einem weiterführenden Artikel in MNU 33/3 ein Simulationsexperiment zum Entstehen des Aktionspotentials in Nervenfasern vorstellen.

Die Vorrichtung besteht aus zwei Glaskammern, zwischen die eine dünne halbdurchlässige Membran gespannt wird. Diese wird vor dem Versuch in destilliertem Wasser gewässert.

Die eine Kammer wird mit einer KCl Lösung von 0,1 mol/l (0,01 mol/l), die andere mit einer KCl Lösung von 1 mol/l gefüllt. Passende Elektroden werden in die Flüssigkeiten getaucht und mit einem Meßverstärker verbunden.

Nach einiger Zeit zeigt das Meßinstrument einen konstanten Wert an, das Gleichgewichtspotential ist erreicht. Unter Verwendung einer  $K^+$  selektiven Membran, lassen sich die Gültigkeit der Nernstschen Gleichung und auch die Entstehung des Ruhepotentials im lebenden Organismus erklären.



**Abb.6,1:** Schematischer Versuchsaufbau zur Messung des Ruhepotentials

## Die Nervenzelle als Spannungsquelle

Voraussetzung für die Informationsübertragung in den Nervenbahnen ist eine elektrische Spannungsdifferenz zwischen dem Außenraum der Zelle und dem Zellinneren.

Wie bringt die Nervenzelle bewegliche Ladungen, also im Wasser gelöste Ionen dazu, in eine bestimmte Richtung zu wandern?

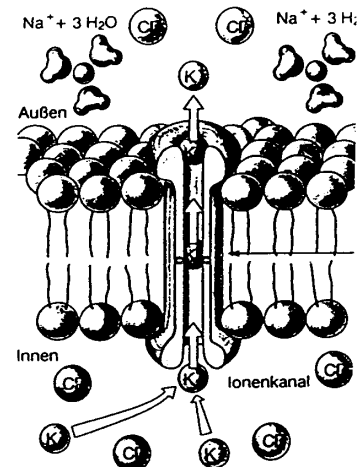
Im Inneren der Zelle herrscht eine hohe KCl-Konzentration und nur eine geringe NaCl-Konzentration, im Außenraum ist es gerade umgekehrt. Die Zellwand, die Innen- und Außenraum voneinander trennt, ist von schlauchartigen Kanälen durchsetzt. Diese sogenannten Ionenkanäle besitzen in der Mitte eine negativ geladene Zone und lassen daher nur positive Ionen hindurch, die negativen Ladungsträger werden zurückgestoßen.

Allerdings sind die Ionenkanäle so dünn, daß nur Kaliumionen passieren können. Die ansich auch positiv geladenen Natriumionen schleppen nämlich eine fester gebundene Hülle aus Wasserdipolen mit sich und würden daher steckenbleiben.

Die Kaliumkonzentrationen zu beiden Seiten der Zellwand versuchen sich nun auszugleichen. Dabei wandern im Mittel mehr positive Kaliumionen bedingt durch ihre thermische Bewegung von innen nach außen.

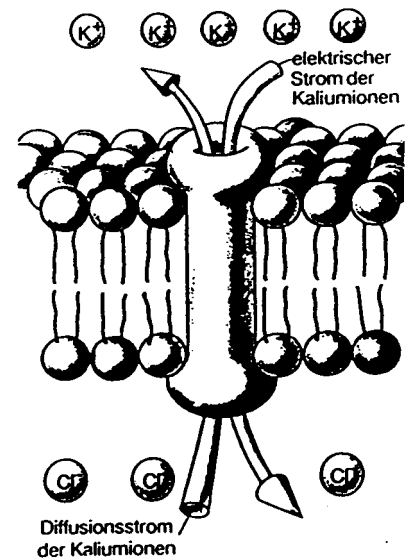
Diese Bewegung einer elektrischen Ladung stellt einen elektrischen Strom dar. Natrium- und Chlorionen können im Normalzustand nicht passieren und tragen daher auch nichts zu dem elektrischen Strom bei.

Da der Innenraum der Zelle anfänglich elektrisch neutral war, die Kaliumionen nun aber teilweise den Innenraum verlassen haben, besteht im Innenraum ein negativer Ladungsüberschuß. Die Innenseite der Zellwand hat sich also gegenüber dem Außenraum negativ aufgeladen. Diese Spannung zwischen Innen- und Außenraum wollen wir in einem Versuch messen!



Die im Nervenzellinneren im Überschuss vorhandenen  $K^+$ -Ionen wandern durch Kanäle nach außen. Die negative Ladung im Kanalinneren verhindert die Wanderung der  $Cl^-$ -Ionen, dadurch erfolgt eine Ladungstrennung.

Abb. 6,2:



Im Gleichgewicht kompensiert der Diffusionsstrom der  $K^+$ -Ionen (verursacht von Wärmebewegung und unterschiedlicher Konzentration zwischen Innen- u. Außenraum der Zelle) den elektrischen Strom, der durch die Ladungstrennung verursacht wird.

Abb. 6,3;

**Aufgabe:**

- Fertige eine Skizze des aufgebauten Demonstrationsversuches an! Gib auch die beiden Konzentrationen in den Glaskammern an. Was entspricht bei diesem Versuchsaufbau der Zellwand?
- Welche Spannung hat sich im dynamischen Gleichgewicht eingestellt?
- Nachdem die Wanderung der Kaliumionen auf ihrer thermischen Bewegung in Verbindung mit einem Konzentrationsunterschied beruht, müßte es doch möglich sein, dieses Gleichgewicht zu stören! Wie könnte man die sich einstellende Spannung verändern?
- Fallen dir Vorteile ein, die wir durch diesen letztgenannten Umstand als Warmblüter gegenüber Kaltblüter haben könnten?

**Fragen:**

1. Warum wandern die Kaliumionen von Innen nach Außen?
2. Natriumionen sind auch positiv geladen, wandern sie auch durch die Ionenkanäle? Wenn nein, warum nicht?
3. Was bewirkt das Ausströmen der positiven Kaliumionen aus der Zelle?
4. Positive und negative Ladungen ziehen einander doch an! Warum folgen die negativen Chlorionen nicht den positiven Kaliumionen durch die Ionenkanäle?

# Elektromyogramm

## Inhalt:

Die Nervenleitung anhand einer Muskelbewegung als physikalischer Vorgang.

## Zielsetzung:

- Wiederholung des biologischen Vorwissens und Verknüpfung mit physikalischen Denkweisen
- Messungen mit dem Oszillosgraph durchführen und interpretieren können
- Übergang vom Ruhepotential zum Aktionspotential erklären können

## Material:

Differenzverstärker aus Phywe Magnetbausteinsystem zusammengestellt (siehe nachfolgende Schaltskizze); abgeschirmte Verbindungskabel und 2 scheibenförmige Kupferelektroden (Schillingmünzen).

## Grundlagen der Weiterleitung

Beim Nervensystem unterscheidet man je nach Funktion in *willkürliches*, auf Sinneindrücke reagierend, und *autonomes* Nervensystem, das die Funktionen der inneren Organe steuert.

Die Nervenleitung spielt sich in den Nervenfasern ab. Sie beruht auf einer kurzfristigen elektrischen Spannungsänderung (Aktionspotential) der Zellmembran, die eine andauernde elektrische Spannung der Membran voraussetzt (Ruhepotential).

Die Membran weist im Ruhezustand eine besonders große Durchlässigkeit für Kaliumionen auf, während sie für Natriumionen nahezu undurchlässig ist.

Die Weiterleitung von elektrischen Impulsen, in deren zeitlichen Abfolge die eigentlichen Informationen (Sinneseindrücke, Befehle vom Gehirn an Muskeln,...) kodiert sind, setzt einen Erregungsvorgang voraus. Dieser besteht aus einer vorübergehenden Änderung der an der Zellmembran liegenden Potentialdifferenz. Dabei wird die Innenseite der Nervenzelle kurzzeitig positiv, die Außenseite negativ geladen; eine komplette Umpolung hat stattgefunden.

Ursache dieser Umpolung der Membran im Augenblick der Erregung ist eine plötzliche, kurzfristige und mehrhundertfache Durchlässigkeitssteigerung für Natriumio-



## Was läuft denn da den Nerv entlang?

Willst du einem deiner Muskeln einen willkürlichen Befehl geben ( Arm heben, Finger krümmen...), dann muß diese Information vom Gehirn den Muskel auch tatsächlich erreichen. Die willkürlichen Muskeln reagieren nur auf Reize der angreifenden Nerven.

Was passiert also in einer Nervenfaser?

Um den Muskelzellen die Information zur Kontraktion mitzuteilen, tritt örtlich begrenzt eine kurzfristige Änderung des Potentials in der Nervenzelle auf, was folgendermaßen erreicht wird:

Beim Ruhepotential sind die Natriumkanäle in der Zellwand geschlossen, nur ein Teil der Kaliumporen ist offen. Durch einen chemischen Steuerungsprozeß wird ein kleines Stück der Zelltrennwand kurzfristig für Natriumionen durchlässig. Die Natriumionen strömen nach innen und laden die Innenseite der Zelle, die im dynamischen Gleichgewicht negativ ist, positiv auf. Danach schließen sich die Natriumionenkanäle wieder, die Kaliumionenkanäle öffnen sich vermehrt, sodaß die Innenseite der Zelle wieder negativ wird. Der Ruhewert ist wieder erreicht.

Stellt man das Potential zwischen Innen- und Außenseite der Zelle als Funktion der Zeit dar, ergibt sich etwa folgende Kurve:

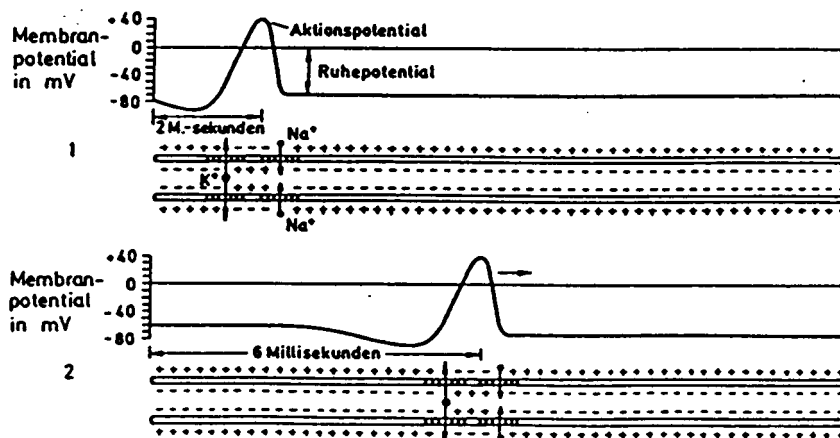


Abb. 6,5: Fortpflanzung eines Nervensignals in einer Nervenfasern



**Fragen:**

- Welchen Wert hat auf der vorigen Abbildung das Ruhepotential? Ist die Innenseite dabei positiv oder negativ geladen?
- Welchen Wert hat das Aktionspotential?
- Wie lange dauert dabei der gesamte Prozeß der Umladung der Zellmembran in Sekunden?
- Auf der zweiten Zeichnung der Abbildung sieht man, wie das elektrische Signal entlang der Nervenfaser weitergeleitet wird. Überlege, wie die Weiterleitung zustande kommen könnte!

## Wie stark bist du?

Nachdem man bei Messungen am lebenden Objekt nur schwer eine Elektrode in die Zelle hineinstecken kann, mißt man Aktionspotentiale häufig durch zwei Elektroden an der Außenseite.

Bei ruhender Nervenfasern tritt dann keine Spannung zwischen den Elektroden auf. Warum nicht?

Läuft jedoch ein elektrisches Signal über die Nervenfasern, erreicht es zuerst die eine Elektrode, die dadurch gegenüber der anderen negativ wird. Die auftretende Spannung kann man messen. Muskelbewegungen werden durch solche Nervenfasern gesteuert.

### Versuch:

Nachstehende Abbildung zeigt schematisch unseren Versuchsaufbau

**Abb. 6,6:** Graphische Aufzeichnung von elektrischen Signalen einer Nervenfasern

### Aufgabe:

Befestige zwei Kupferelektroden mit Klebeband auf deinem Bizeps (ca. 4-5 cm voneinander entfernt). Versuche den Muskel zuerst zu entspannen und dann langsam anzuspannen. Wiederhole mit einem plötzlichen, ruckartigen Anspannen. Beobachte dabei den Bildschirm am Oszilloskop.

### Frage:

- Gibt es einen Zusammenhang zwischen der auftretenden Spannung und der Stärke deiner Muskelanspannung? Wenn ja, welchen?

# Elektrokardiogramm (EKG)

## Inhalt:

Aufnahme eines Elektrokardiogramms des menschlichen Herzens

## Zielsetzung:

- Eine der gebräuchlichsten medizinischen Untersuchungsmethoden vom Prinzip her zu durchschauen
- Technische *Maschinen* als Hilfsmittel des Menschen - in diesem Fall als Diagnosehilfsmittel - zu interpretieren. Diese Einstellung der Technik gegenüber sollte freilich nicht nur die Angst vor technischen (Untersuchungs) Methoden abbauen, sondern auch zur Einsicht eines verantwortungsbewußten Umgangs mit eben diesen führen
- Anwendbarkeit physikalischer Grundlagen auf den *stromdurchflossenen Leiter Mensch* aufzuzeigen
- Wiederholung und Vertiefung bereits bestehender biologischer Vorkenntnisse
- Anfertigen von schematischen, aber übersichtlichen Versuchsskizzen; Interpretation von Kurvenverläufen am Oszilloskop

## Material:

Digitalvoltmeter; feuchte Tücher; 2 Plattenelektroden mit abgeschirmten Verbindungskabel verlötet; Differenzverstärker (z.B. aus Phywe Magnetbausteinsystem zusammengesetzt); Oszilloskop: als x-Achsen Einstellung wurden 250 ms gewählt, was zu gut differenzierbaren Spannungsimpulsen geführt hat.

## Grundlagen des EKG

Die elektrische Herzerregung geht vom Sinusknoten aus. Von dort breitet sich die Depolarisation von den Vorhöfen über die Kammern des Herzens aus, d.h. die einzelnen Muskelfasern des Herzens werden je nach ihrer Lage zeitlich verschoben erregt. Der Sinusknoten wird auch oft als natürlicher Herzschrittmacher bezeichnet, weil er die höchste Erregungsfrequenz (60-80 Schläge pro Minute in Ruhe) besitzt. Das Herz verfügt zwar noch über andere Erregungszentren, die im Notfall ebenfalls

zur Autonomie fähig sind, ihre Eigenfrequenz liegt aber deutlich unter der des Sinusknoten.

Bei der Ausbreitung und Rückbildung der Erregung des Herzens entsteht ein elektrisches Feld eines schwingenden Dipols.

Physikalisch gesehen liegt hier somit eine unregelmäßige, aber periodische Wechselspannung mit dauernd räumlicher Lageänderung der Pole vor. Man erhält zu jedem Zeitpunkt verschiedene Dipolmomentvektoren, die zu einem Summationsvektor resultieren. Berechnet man die Gesamtheit aller Dipolmomente zu einem beliebigen Zeitpunkt (wobei sich nach Schätzungen 90% der Einzelvektoren gegenseitig auslöschten), erhält man die gleiche Potentialverteilung wie bei einem einzigen Dipol mit entsprechendem Dipolmoment.

Die verschiedenen Aktionspotentiale (also kurzfristige Spannungsänderungen) dieser einzelnen Teile des Herzens liefern ein *resultierendes* Aktionspotential des Herzens (siehe Schülerinformation). Die erste Welle, P-Zacke genannt, entspricht der Erregung in den Vorhöfen. Die Zeitspanne bis zur Q-Zacke entspricht der Weiterleitung des Impulses zu den Kammern. Die QRS-Zacke entspricht der Erregung der Kammern. Nach einiger Zeit werden die Kammern repolarisiert, dies ist in der T-Zacke sichtbar. Der QRS-Komplex ist deshalb viel größer als die P-Zacke, weil die Masse der Kammer größer ist als die des Vorhofes.

## EKG - Aufnahme

Vereinfacht nimmt man an, daß der menschliche Körper einen *homogenen* Leiter darstellt. Relativ zur Körperoberfläche ist die Herzzelle *punktförmig* klein. Daher fließt aus diesem Punkt ein kugelsymmetrischer Membranstrom heraus. Dieser gelangt zur Körperoberfläche. Man registriert also bei einer EKG Aufnahme ein Gesamtpotential, das sich während des Herzschlages fortwährend nach Richtung und Ausmaß ändert. Unter Vereinfachung der Verhältnisse kann man sich diese z.B. von den Extremitäten abzuleitende Potentialschwankungen auf ein einfaches Dreieckschema reduziert und projiziert vorstellen (siehe Schülerinformation). Diese Projektionen werden in der Medizin - abhängig davon, wo die Abgreifpunkte angebracht sind- als *Ableitungen* bezeichnet.

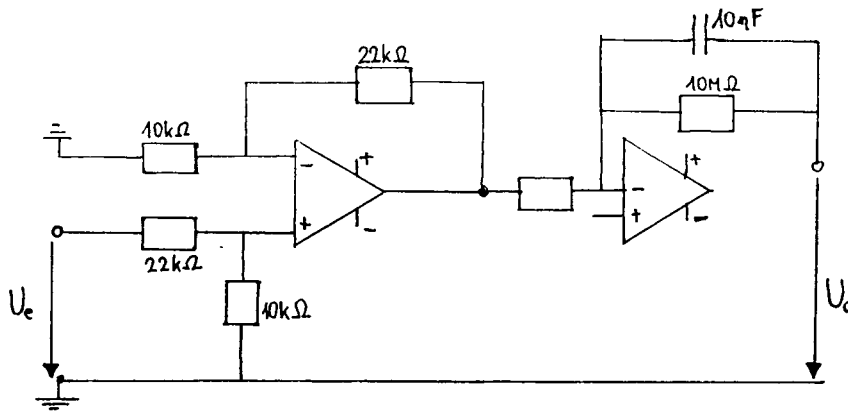


Abb. 6,7: Differenzverstärker aus Phywe Magnetbausteinsystem

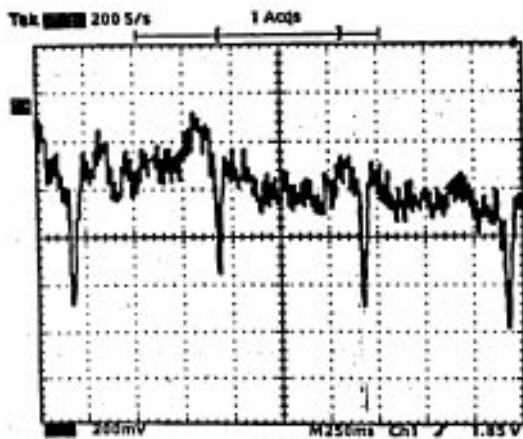


Abb. 6,8: Oszilloskopbild aus Eigenversuch mittels obigen Differenzverstärkers

# Elektrokardiogramm (EKG)

## Versuch

Für den Versuch brauchst du folgende Dinge:

1 Digitalvoltmeter; 2 feuchte Tücher; Krokoklemmen und Verbindungskabel.

Binde je ein feuchtes Tuch um deinen linken Knöchel und um dein rechtes Handgelenk. Verbinde diese beiden Tücher mit dem Voltmeter (Gleichspannung einstellen!). Sitze zuerst möglich ruhig da und beobachte die Anzeige des Digitalvoltmeters. Bewege dann einen Arm, beide Arme, einen Arm und ein Bein.

## Aufgabe

- Was kannst du beobachten?
- Gibt es einen Zusammenhang zwischen deiner körperlichen Aktivität und deinen Beobachtungen? Wenn ja, welchen?
- Warum verwenden wir feuchte Tücher? Würde der Versuch mit trockenen auch gelingen?
- Welche physikalische Größe mißt du mit dem Anzeigegerät?
- Versuche, eventuell in kleinen Gruppen, eine mögliche Erklärung für deine Beobachtungen zu finden!
- Fertige eine kleine Skizze des Versuches an! Vermerke auch, wenn du Schwierigkeiten mit der Durchführung hattest.

## Das Herz - ein Sender?

Falls dein Versuch gelungen ist, was nicht immer der Fall ist, hast du soeben dein eigenes Elektrokardiogramm aufgenommen - zumindest fast!

Was bedeutet nun eigentlich Elektrokardiogramm (abgekürzt: EKG)?

EKG ist aus verschiedenen Wörtern zusammengesetzt und kann etwa so übersetzt werden: *kardio* [gr.]: hat die Bedeutung *Herz*; *gramm* [gr.]: hat die Bedeutung *Schrift* oder *Darstellung* (denke an Autogramm). Zusammengefaßt handelt es sich also um die graphische Darstellung der elektrischen Aktivität des Herzens! Wußtest du, daß dein Herz elektrisch aktiv ist?

In der Medizin gehört das EKG heute zu einer der häufigsten Untersuchungsmethoden. Der erfahrene Arzt kann daraus wichtige Rückschlüsse auf die Arbeitsweise deines Herzens ziehen. Er kann angeborene oder lebensbedingte Erkrankungen feststellen, aber sieht daraus natürlich auch, daß alles in Ordnung ist!

Für die medizinische Auswertung reicht unsere vorige Meßmethode natürlich nicht aus, obwohl der prinzipielle Versuchsaufbau sehr ähnlich ist, aber eben nicht genau genug. In der Medizin mißt eine dafür konstruierte Maschine die elektrische Aktivität des Herzens, verstärkt und zeichnet sie auf einem speziellen Papier auf.

Woher kommen nun diese Spannungen, die wir an bestimmten Punkten unserer Körperoberfläche messen können? Werfen wir einen Blick in unser Herz!

Der Herzmuskel, der die vier Herzkammern umfaßt, kontrahiert (zieht sich zusammen) sich in körperlicher Ruhe ca. 70mal pro Minute. Wenn sich die beiden großen Herzkammern zusammenziehen, zwingen sie das Blut aus dem Herzen heraus und sorgen so für die Zirkulation durch den Körper.

Damit der Herzmuskel aber überhaupt kontrahiert, braucht er von irgendwoher einen *Einsatzbefehl*. Der *Sender* der elektrischen Impulse, die den Herzmuskel letztlich veranlassen, sich zu verkürzen, sitzt im Herzen selber, im sogenannten *Sinusknoten*. Dieser gibt in Ruhe den oben genannten Schlagrhythmus (die Frequenz) von ca. 70 - 80mal pro Minute vor. Vom Sinusknoten aus breitet sich die elektrische Erregung über das ganze Herzen aus.

Wie jeder arbeitende Muskel ruft auch der Herzmuskel winzige elektrische Ströme hervor, wobei die verschiedenen Ereignisse im Herzen (Kontraktion und Entspannung der Vorhöfe bzw. der Kammern) auch verschieden Muster an elektrischen Strömen erzeugen. Die Ströme gehen durch den Körper und erreichen seine Oberfläche, die Haut. Drähte aus dem Elektrokardiographen enden als Elektroden, die auf der Haut angebracht werden. Der Elektrokardiograph nimmt die Ströme wahr und wandelt die Flüsse, die Unterbrechungen und Umkehrungen des Stromes in ein bestimmtes Muster aus Linien um.

Dabei entsteht das EKG!

Je nachdem, an welchen Punkten des Körpers die Elektroden angebracht werden, entstehen verschieden Aufzeichnungen. Abb. 6,9 zeigt einen Graphen, der entsteht, wenn die Spannungsdifferenz zwischen den beiden Armen gemessen wird.

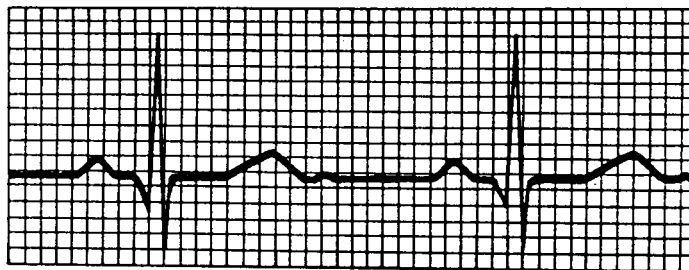


Abb. 6,9: Aufnahme eines EKG zwischen linkem und rechtem Arm



## Mein eigener Herzschlag

### Versuch:

Zwei Plattenelektroden mit Kreppklebeband werden auf der nackten Haut über deinem Herz befestigt. Da die auftretenden Spannungsdifferenzen sehr klein sind, müssen sie durch einen Differenzverstärker vergrößert werden, bevor sie auf dem Oszilloskop aufgezeichnet werden. Abb. 6,9 zeigt eine Skizze unseres Versuchs.

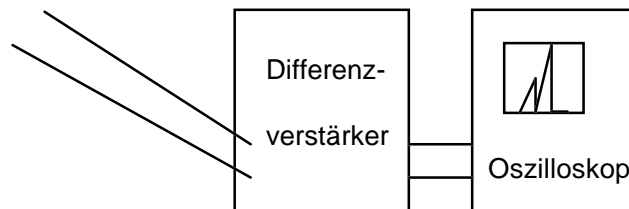


Abb. 6,10: Schematischer Versuchsaufbau zur Aufnahme eines EKG

### Aufgabe:

- Drücke die zwei Plattenelektroden auf die nackte Haut über deinem Herzen. Wähle als Zeiteinstellung 250ms. Beobachte das Bild auf dem Oszilloskop und finde zwei Punkte, bei denen sich ein gleichmäßiges Muster aus Zacken ergibt. Befestige die Elektroden mittels Kreppklebeband.
- Wenn du mit deinem Bild zufrieden bist, laß es vom Oszilloskop speichern; das Bild sollte dann ruhen!
- Ermittle aus dem gespeicherten Bild deine derzeitige Herzfrequenz.

## Wie die Zacken entstehen!

Wie du aus der Aufnahme deines eigenen EKG gesehen hast, befinden sich die Muskelfasern in deinem Herzen fortwährend in einem anderen Spannungszustand. Je nachdem ob sich der Herzmuskel gerade zusammenzieht oder entspannt, erhält man beim EKG ein typisches Muster aus Zacken und Wellen - die Spannung zwischen zwei Meßpunkten bleibt also nicht konstant. Diese veränderlichen Verhältnisse in deinem Herzen wollen wir im folgenden Versuch nachbauen.

### Versuch:

Pro Gruppe werden folgende Dinge zur Durchführung benötigt:

1 Löschpapier DIN4 (dickere Qualität); Bleistift und Schere; 1/8l Wasser; etwas Kochsalz; 1 Digitalvoltmeter mit Verbindungskabel und Krokoklemmen; eine veränderliche Spannungsquelle, die ihr euch leicht selber aus 4 Mignonbatterien, einem Batterienhalter und Metallblättchen bauen könnt (s. Abb. 6,11).

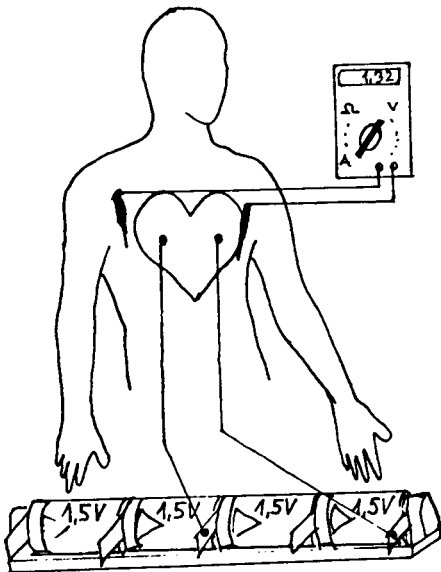


Abb. 6,11: Skizze zur Durchführung des Versuchs: der Batterienhalter ist mit 1,5 V Batterien in der vorgeschriebenen Orientierung bestückt. Zwischen allen Pluspolen werden kleine Metallblättchen eingeklemmt, sodaß man in Schritten von 1,5 V unterschiedliche Spannungen entnehmen kann.

**Aufgabe:**

- Schneidet aus dem Löschpapier (ganze Seite ausnutzen) ein Modell eines Oberkörpers und zeichnet ein übergroßes Herz ein. Von der Spannungsquelle (zuerst nur von einer Batterie abnehmen) gehen die Verbindungskabel zum Herzen und werden dort im Abstand von ca. 2 cm mit Krokoklemmen befestigt. Befeuchtet das Löschpapier im und um das Herz nun tropfenweise mit Wasser; das Papier sollte gut angefeuchtet, aber nicht durchweicht sein.
- Stecke die Spannungsprüfer (meist rot und schwarz) in die dafür vorgesehenen Buchsen des Digitalvoltmeters. Bevor ihr das Meßgerät einschaltet, überlegt welchen Meßbereich ihr mittels der Wählscheibe einstellen müßt.
- Einer von euch mißt nun die Spannung, die zwischen zwei Punkten in der Nähe des Herzens besteht, spielt also die Rolle des Arztes, der ein EKG aufnimmt. Ein anderer übernimmt die Rolle des arbeitenden Herzens, indem zwei, drei und dann vier Batterien benutzt werden. Notiert eure Meßwerte! Verändert auch die Polung, indem ihr die Kabeln der Spannungsquelle vertauscht. Was passiert dabei auf dem Meßgerät?
- Schreibt eure Beobachtungen in eigenen Worten auf!
- Streut nun etwas Salz auf das Löschpapier und laßt ein wenig einwirken (wenn nötig, noch tropfenweise Wasser auftragen). Wiederholt eure Messungen und vergleicht mit den vorigen Werten von reinem Wasser. Kommt es zu einer Änderung? - wenn ja, warum? Würde auch eine Änderung eintreten, wenn man statt Salz Zucker daraufstreut?
- Halte aufgetretene Schwierigkeiten bei der Versuchsdurchführung sowie Verbesserungsvorschläge fest.
- Diskutiere deine Ergebnisse in der Klasse!

# Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit versucht den Menschen- im speziellen das menschliche Herz-Kreislaufsystem- in den Mittelpunkt physikalischer Überlegungen zu stellen.

Dabei wurde aufgezeigt, daß die Funktionsweise des Herzens und lebenswichtige Regulationsmechanismen des Kreislaufsystems wesentlich auf physikalischen Gesetzmäßigkeiten beruhen. Das Herz wurde aber nicht nur auf seine mechanische Pumpenfunktion hin untersucht, sondern auch als Beispiel für einen selbsterregenden Oszillator erkannt. Die Mechanismen der Signalweiterleitung rundeten schließlich den *theoretischen* Teil ab.

So naheliegend physikalische Grundlagen und deren Aussagekraft aber auch sein mögen, möchte diese Arbeit nicht als eine Reduzierung verstanden werden, die das Herz nur als eine Art mechanische Pumpe oder als elektrisches Erregungszentrum betrachtet. Vielmehr sollte der Aspekt eines faszinierenden, selbstregulierenden geschlossenen (Kreislauf)-Systems herausgearbeitet werden, dessen einzelnen Komponenten in Abhängigkeit voneinander optimal zusammenspielen.

Der umfassende didaktische Teil dieser Arbeit bietet möglichst kompakte Kurzinformation zu den einzelnen Teilgebieten und Anregungen zur Umsetzung im Unterricht. Den Schülerinformationen und Arbeitsblättern wurden unter anderem folgende didaktische Kriterien zugrunde gelegt:

- Die gestellte Problematik sollte von einer für den Schüler bedeutsamen Aufgabe ausgehen. Informationen und Aufgabenstellungen sollen mit bisherigen Erfahrungen verbunden werden können, mit vorhandenen Kenntnissen jedoch nicht vollständig zu lösen sein.
- Der darauf basierende Unterricht soll vorhandene Kenntnisse, Fähigkeiten und Fertigkeiten aktivieren und zu deren Erweiterung führen.
- Die aktive Auseinandersetzung der Schüler mit der Aufgabe soll ermöglicht werden, wobei selbständige und unterschiedliche Lösungswege zugelassen werden.

Die *Reise durch den menschlichen Körper* kann so zu einem spannenden Abenteuer für Lehrer und Schüler werden, zu dem jeder einzelne - je nach seinen Fähigkeiten und Begabungen - beitragen könnte.

# Literaturverzeichnis

- [ 1] L. Mathelitsch: Physikalische Grundlagen der menschlichen Stimme, in: Physik und Didaktik 4 1987 (15)
- [ 2] Zentener/Gitter: Die Schallverarbeitung des Ohres, in: Physik i. u. Zeit 4, 1987 (18)
- [ 3] M. Euler: Computergestützte Experimente zur akustischen Informationsverarbeitung beim Menschen, in: Praxis der Naturwissenschaften Physik 1, 1985 (34)
- [ 4] Gaida/Weinbach: Der Herzzyklus und seine Darstellung im Phonokardiogramm, in: MNU 4, 1994 (47)
- [ 5] Stüssi/Denoth: Sport und Physik, in: Physik i. u. Zeit 1, 1989 (20)
- [ 6] P. Zantner: Physikalische Grundlagen des EKG, in: Praxis der Naturwissenschaften Physik 5, 1988 (37)
- [ 7] P. Labudde: Zum Begriff der Arbeit, in: MNU 7, 1986
- [ 8] Gieseke/Nägerl: Optik des Auges: eine Unterrichtseinheit, in: Praxis der Naturwissenschaften Physik 10, 1975
- [ 9] Peter/Jodl/Stelzenbach: Physik und Medizin, in: Physik und Didaktik
  - 9a: Teil 1: PhuD 4, 1986
  - 9b: Teil 2: PhuD 1, 1988
  - 9c: Teil 3: PhuD 2, 1988
  - 9c: Teil 4: PhuD 1, 1990
- [10] Schmidt/Thews: Physiologie des Menschen, Springer Verlag, 21.Auflage
- [11] Gerthsen/Kneser/Vogel: Physik, Springer Lehrbuch, 16.Auflage
- [12] Ackermann: Physikalische Biochemie, Springer Lehrbuch, 1992
- [13] H. Horvath: Biologische Physik, Hölder-Pichler-Temsky, 1988
- [14] Ramm/Hahn: Physikalische Grundlagen der Physiologie, Georg Thieme Verlag, 1974

- [15] Gauer/Kramer/Jung: Physiologie des Menschen, Band 3, Urban und Schwarzenberg, 1972
- [16] H. Kruse: Der Blutdruck, in: Natur im Unterricht Physik 1, 1990
- [17] Skriptum zur Ablegung der Pharmareferentenprüfung, Telekaff/medidact, 1975
- [18] Teil 1: B. Wolf/A. Burger: Erregungsleitung in Nervenfasern-Modell zur Ruhespannung, in: MNU 2, 1980 (33)  
Teil 2: B. Wolf/A. Burger: Erregungsleitung in Nervenfasern-Modell zum Aktionspotential
- [19] 19a: R. Hobbie: The Electrocardiogram as an Example of Electrostatics, in American Journal of Physics 41/6 (1973)  
19b: R. Hobbie: Nerve Conduction in the Pre-Medical Physics Course, in American Journal of Physics 41/10 (1973)  
19c: R. Hobbie: Improved Explanation of the Electrocardiogram, in American Journal of Physics 52/8 (1984)
- [20] G. Sauer: Aspects of Physiology in High School Physics, in Interdisciplinary Aspects of Physics Education, World Scientific 1990
- [21] G. Hoffmann: Quantitative Elektromyographie in der Biomechanik, in Physik i. u. Zeit 5 (1988)
- [22] J. Strackee/N. Westerhof: The Physics of Heart and Circulation, IOP 1993
- [23] A. Schiller: Strömungsmechanik, in: Praxis der Naturwissenschaften Physik 2, 1995 (44)

# Abbildungsquellennachweis

Quellenangaben, in eckigen Klammern gesetzt, beziehen sich auf das vorangehende Literaturverzeichnis. S. steht nachfolgend für die entsprechende Seitenzahl in der Quellliteratur.

2,1	U. Kressin: Unser Körper (Teil 1); Schulfunk; S. 39
2,2	[10]; S. 415
2,3	[10]; S. 416
2,4	[10]; S. 417
2,5	[14]; S. 249
3,1	[10]; S. 434
3,2	[11]; S. 99
3,3	[11]; S. 102
3,4	[14]; S. 267
3,5	[14]; S. 267
3,6	[13]; S. 61
3,7	[14]; S. 264
3,8	[14]; S. 265
3,9	[10]; S. 449
3,10	[14]; S. 283
4,1	[16]; S. 29
4,2	[16]; S. 32
4,3	[16]; S. 33
4,4	[14]; S. 283
4,5	U. Kressin: Unser Körper (Teil1); S. 39, Schulfunk
4,6	eigen
4,7	eigen
4,8	U. Kressin: Unser Körper (Teil 1); S. 42, Schulfunk
4,9	[10]; S. 393
4,10	eigen

5,1	[14]; S. 290
5,2	[14]; S. 291
5,3	[14]; S. 293
5,4	[14]; S. 294
5,5	Lindner: Biologie (Teil 2); Verlag Gustav Swoboda; S. 81
5,6	w.o.
5,7	[10]; S. 393
5,8	[14]; S. 308
5,9	[14]; S. 309
5,10	[10]; S. 404
5,11	[10]; S. 407
5,12	[14]; S. 311
5,13	[14]; S. 317
5,14	[14]; S. 319/320
6,1	eigen
6,2	Sexl,Kühnelt,u.a.: Physik (Teil 3); Hölder-Pichler-Temsky; S. 16
6,3	w.o.; S. 17
6,4	eigen
6,5	[9b]; S 15
6,6	Lindner: Biologie (Teil 2); Verlag Gustav Swoboda; S. 83
6,7	eigen
6,8	eigen
6,9	H. Schneider: Naturwissenschaften in der Alltagssprache, S. 112
6,10	eigen
6,11	eigen