

## Der Mensch – ein elektrisches Wesen

Der Mensch ist aus physikalischer Sicht nicht nur ein offenes thermodynamisches System. Er ist auch ein Energiewandler mit einem bestimmten Wirkungsgrad, verfügt über Temperatur-, Schall-, Geruchs- und Geschmackssensoren und ist vor allem ein Wesen, in dem vielfältige elektrische Vorgänge vor sich gehen. Die Reizfortleitung, die Steuerung der Herztätigkeit oder der Hirntätigkeit erfolgen durch elektrische Impulse. Wir betrachten nachfolgend einige ausgewählte Aspekte.

### Der Mensch als Spannungsquelle

Tierische und menschliche Zellen sind von einer hoch spezialisierten Zellmembran umgeben. Dabei handelt es sich im Wesentlichen um Lipoprotein-Schichten mit einer Dicke von 0,007 bis 0,008  $\mu\text{m}$ . Diese Zellmembran grenzt zum einen das Innere der Zelle gegen den Außenraum ab. Zum anderen verfügt sie über aktive Transportmechanismen und veränderliche Durchlässigkeiten (Permeabilitäten) für verschiedene Stoffe.

Im nicht erregten Zustand (Ruhezustand) werden unter Aufwand von Energie Kalium-Ionen in das Zellinnere und Natrium-Ionen nach außen transportiert (Abb. 1a). Dabei entsteht ein Konzentrationsgefälle, denn die Konzentration der  $\text{K}^+$ -Ionen ist im intrazellulären Raum 20- bis 40-mal höher als im extrazellulären Raum. Infolge dieses Konzentrationsgefälles diffundieren  $\text{K}^+$ -Ionen so lange nach außen, bis durch die negative Aufladung des Zellinnern ein elektrisches Feld entsteht, das der weiteren Diffusion entgegenwirkt.

Es stellt sich ein Gleichgewichtszustand ein (Abb. 1b). In diesem Zustand ist die Zelle polarisiert. Physikalisch handelt es sich um ein Diffusionspotenzial.

Die Spannung (Potenzialdifferenz), das sogenannte Ruhepotenzial, liegt für die einzelne Zelle im Bereich von 70–90 mV.

Durch Erregung einer Zelle erhöht sich die Durchlässigkeit der Zellmembran für  $\text{Na}^+$ -Ionen schlagartig auf mehr als das Hundertfache. Der Einstrom positiver Ladungsträger ( $\text{Na}^+$ -Ionen) führt zu einem Abbau des Membranpotenzials, zu einer **Depolarisation** (Abb. 1c). Es kommt dabei sogar zu einer Umkehr der Potenzialrichtung, zu einem „Overshoot“. Dieser Overshoot wird anschließend durch einen verstärkten Austritt von  $\text{K}^+$ -Ionen wieder abgebaut (Abb. 1d). Die bei diesem Vorgang auftretenden Potenziale, die **Aktionspotenziale**, liegen für eine Zelle zwischen 80 mV und 120 mV. Durch Austausch von  $\text{Na}^+$ - und  $\text{K}^+$ -Ionen wird der ursprüngliche Zustand wiederhergestellt. Die an Zellmembranen auftretenden elektrischen Phänomene sind also letztlich nichts anderes als die Ergebnisse des Austauschs von  $\text{Na}^+$ - und  $\text{K}^+$ -Ionen durch diese Membran.

Die Dauer der Depolarisation und der Repolarisation ist bei einzelnen Zellen unterschiedlich. Bei Myokardfasern liegt diese Zeit bei etwa 300 ms, bei Nerven- und Skelettmuskelfasern bei ca. 1 ms.

Grundsätzlich gilt für den Zusammenhang zwischen den elektrischen Vorgängen an Zellen und den mechanischen Vorgängen der Muskelkontraktion: Der Prozess der Kontraktion wird durch den elektrischen Erregungsprozess ausgelöst. Bei einzelnen Organen

wirken dabei ganze Mu von bestimmten Zentre ordinierte Herztätigkei aus, der die Herzzykle Funktion hat der Sinu des Herzens befindet.

Zu jedem Zeitpunkt e der dabei verlaufende Körper eine bestimm alverteilung vorhande zwei Punkten der Kör zeitabhängige Potenz über Elektroden abgeg kann. Man erhält zeitl Form von Kurven, die b **ogramm** (EKG) und beir **logramm** (EEG) bezeich

Als Abnahmepunkte v der Körperoberfläche weil der Spannungsver hängig ist. Darüber hir schen Elektroden und l bis zu 300 mV auftritt Aktionsspannungen ük die Aktionsspannunge gionen ist in der Tabell

Aus einem EKG (Abb. 1) Al rungen der Herztätigk erste Elektrokardiogra aufgezeichnet, das Ve wesentlich verbessert.

### Aktionsspannungen

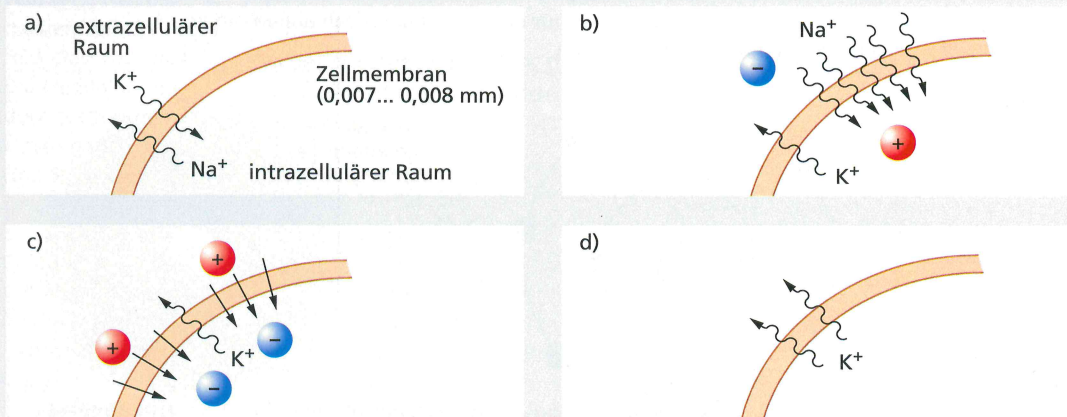
Herzaktionsspannung (EKG)

Hirnaktionsspannung (EEG)

Aktionsspannziale der Skelettmuskulatur (EMG)

Aktionsspannung des Magens (EGG)

Aktionsspannung der Gebärmutter (EUG)



1 Entstehung von Ruhepotenzial und Aktionspotenzial an einer Zelle



wichtszustand ein  
ist die Zelle polari-  
um ein Diffusions-

12), das sogenannte  
einzelne Zelle im Be-

öht sich die Durch-  
Na<sup>+</sup>-Ionen schlag-  
fache. Der Einstrom  
nen) führt zu einem  
zu einer **Depolarisa-**  
sogar zu einer Um-  
einem „Overshoot“.  
ßend durch einen  
n wieder abgebaut  
gang auftretenden  
le, liegen für eine  
IV. Durch Austausch  
r ursprüngliche Zu-  
ellmembranen auf-  
ne sind also letztlich  
des Austauschs von  
lebran.

der Repolarisation  
chiedlich. Bei Myo-  
wa 300 ms, bei Ner-  
i ca. 1 ms.  
menhang zwischen  
zellen und den me-  
telkontraktion: Der  
ch den elektrischen  
einzelnen Organen



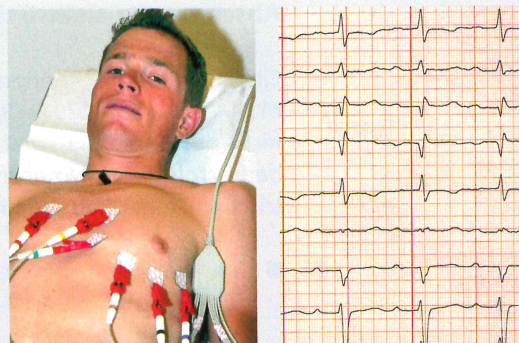
wirken dabei ganze Muskelgruppen zusammen, teils von bestimmten Zentren gesteuert. So setzt die koordinierte Herztätigkeit einen „Schrittmacher“ voraus, der die Herzzyklen auslöst und steuert. Diese Funktion hat der **Sinusknoten**, der sich im Vorhof des Herzens befindet.

Zu jedem Zeitpunkt eines Herzzyklus ist aufgrund der dabei verlaufenden elektrischen Vorgänge im Körper eine bestimmte, zeitabhängige Potenzialverteilung vorhanden. Damit existiert zwischen zwei Punkten der Körperoberfläche eine ebenfalls zeitabhängige Potenzialdifferenz (Spannung), die über Elektroden abgegriffen und registriert werden kann. Man erhält zeitveränderliche Spannungen in Form von Kurven, die beim Herzen als **Elektrokardiogramm (EKG)** und beim Gehirn als **Elektroenzephalogramm (EEG)** bezeichnet werden.

Als Abnahmepunkte werden definierte Stellen an der Körperoberfläche verwendet. Das ist wichtig, weil der Spannungsverlauf von den Messstellen abhängig ist. Darüber hinaus ist zu beachten, dass zwischen Elektroden und Haut Kontaktspannungen von bis zu 300 mV auftreten können, die sich mit den Aktionsspannungen überlagern. Eine Übersicht über die Aktionsspannungen in verschiedenen Körperregionen ist in der Tabelle unten gegeben.

Aus einem EKG (Abb. 1) ist erkennbar, ob Störungen der Herztätigkeit vorliegen oder nicht. Das erste Elektrokardiogramm wurde 1887 von WALLER aufgezeichnet, das Verfahren 1903 durch EINTHOVEN wesentlich verbessert.

Aktionsspannungen	Frequenz in Hz	Spannung in mV
Herzaktionsspannung (EKG)	0,2 ... 200	0,1 ... 3
Hirnaktionsspannung (EEG)	0,5 ... 70	0,005 ... 0,1
Aktionspotenziale der Skelettmuskulatur (EMG)	10 ... 1000	0,05 ... 5
Aktionsspannung des Magens (EGG)	0,02 ... 0,2	0,2 ... 1
Aktionsspannung der Gebärmutter (EUG)	0 ... 200	0,1 ... 8



1 Die Aufzeichnung des EKG eines Patienten mit normalem Verlauf, die Kurve ist periodisch.

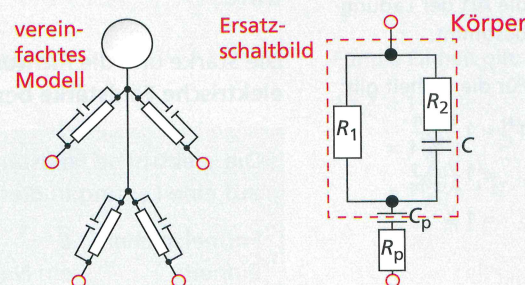
## Der Mensch als elektrischer Leiter

Elektrischer Strom im menschlichen Körper, der durch äußere Spannungsquellen hervorgerufen wird, dient zum einen diagnostischen und therapeutischen Zwecken. Zum anderen kann ein unbeabsichtigter Stromfluss, z.B. durch Berühren einer elektrischen Quelle, überaus gefährlich und sogar tödlich sein. Die Wahrnehmungsschwelle liegt bei 1–2 mA. Bei über 10 mA kommt es zu einer Verkrampfung der Muskulatur. Ströme von über 40 mA können bei längerer Einwirkung tödlich sein.

Der Mensch ist ein Ionenleiter (Leiter 2. Ordnung). Der Körperwiderstand ist abhängig von der Spannung, der Stromart, der Dauer der Einwirkung und vom Stromweg.

Bei Gleichstrom und niederfrequentem Wechselstrom nimmt der Widerstand mit steigender Spannung und Einwirkungsdauer ab. Der Strom strebt einem Grenzwert zu. Ursache dafür ist eine Depolarisierung der Zellgrenzflächen.

Bei Wechselstrom verkleinert sich der Widerstand mit zunehmender Frequenz.



2 Der Mensch als Leiter: Das Ersatzschaltbild beschreibt das elektrische Verhalten.