

Grundlagen zellulärer Erregbarkeit - ZEL

Fakultät für Physik der Ludwig-Maximilians-Universität München – Grundpraktikum für Zahnmediziner
(28. NOVEMBER 2021)

VERSUCHSZIELE

In diesem Versuch lernen Sie die Begriffe Spannung, Stromstärke und elektrischer Widerstand kennen. Außerdem behandeln wir das Ohmsche Gesetz und die Kirchhoffschen Regeln.

Diese Begriffe benötigen Sie für viele Gebiete der Neurophysiologie: Ionenströme innerhalb und zwischen Zellen können so beschrieben und Ladungsveränderungen quantifiziert werden. Neben der Beschreibung der Erregungsausbreitung werden diese Begriffe auch für das Verständnis von EKG und EEG benötigt. Außerdem lernen Sie die Gefahren für den Menschen durch elektrischen Strom kennen.

Contents

I. Teilversuche	2
II. Physikalische Grundlagen	2
II.1. Mikroskopisches Bild geladener Teilchen	2
II.2. Spannung und potentielle Energie von Ladungen	2
II.3. Elektrische Stromstärke	3
II.4. Elektrischer Widerstand	3
1. Grundlagen	3
2. Ohmsches Gesetz	3
3. Spezifischer Widerstand	3
II.5. Elektrische Leistung	4
II.6. Elektrische Schaltungen	4
1. Die Kirchhoffschen Regeln (Gesetze)	4
2. Gesamtwiderstand einer Parallelschaltung	4
3. Gesamtwiderstand einer Reihenschaltung	5
4. Kombination von Parallel- und Reihenschaltung	6
II.7. Messung von Stromstärke, Spannung und Widerstand	7
1. Stromstärkemessung mit dem Amperemeter	7
2. Spannungsmessung mit dem Voltmeter	7
3. Widerstandsmessung mit dem Ohmmeter	7
II.8. Spannungsabhängigkeit von Ionenkanälen	7
II.9. Modell für die elektrotone Erregungsausbreitung	9
II.10. Weitere physiologische Anwendungen	10
III. Technische Grundlagen	11
IV. Versuchsdurchführung	12
IV.1. Elektrischer Widerstand von metallischen Leitern	12
1. Kurzbeschreibung	12
2. Messwerte und Durchführung	12
IV.2. Ohmscher Widerstand	12
1. Kurzbeschreibung	12
2. Messwerte und Durchführung	12
IV.3. Spannungsabhängigkeit von Ionenkanälen	12
1. Kurzbeschreibung	12
2. Messwerte und Durchführung	13
IV.4. Elektrotone Erregungsausbreitung - Dünne, dicke und myelinisierte Nervenzelle	13
1. Kurzbeschreibung	13
2. Messwerte und Durchführung	13
V. Auswertung	14
V.1. Elektrischer Widerstand von metallischen Leitern	14
V.2. Ohmscher Widerstand	14
V.3. Spannungsabhängigkeit von Ionenkanälen	14
V.4. Elektrotone Erregungsausbreitung - Dünne, dicke und myelinisierte Nervenzelle	14

VI. Anhang: Elektrizität und Mensch – Gefahren	14
VI.1. Einwirkungen des elektrischen Stromes auf den Körper	14
1. Physikalische Einwirkungen	14
2. Physiologische Einwirkungen	14
VI.2. Maßnahmen bei elektrischen Unfällen	15

I. TEILVERSUCHE

1. Elektrischer Widerstand von metallischen Leitern
2. Ohmscher Widerstand
3. Spannungsabhängigkeit von Ionenkanälen
4. Elektrotonische Erregungsausbreitung - Dünne Nervenzelle

II. PHYSIKALISCHE GRUNDLAGEN

II.1. Mikroskopisches Bild geladener Teilchen

Die *elektrische Ladung* Q ist eine physikalische Eigenschaft von Körpern und hat als Einheit das Coulomb $[Q] = C = As$. Ladung kann positive oder negative Werte annehmen und ist Null bei ungeladenen Körpern. Die kleinste in der Natur vorkommende Ladungsmenge wird als Elementarladung bezeichnet. Sie beträgt $e = 1,6 \cdot 10^{-19} C$. Jede Ladung ist ein ganzzahliges Vielfaches der Elementarladung. Ein Elektron hat eine negative Elementarladung, ein Proton eine positive Elementarladung.

Normalerweise besitzt ein Atom genauso viele Protonen im Kern wie Elektronen in seiner Hülle. Somit ist es insgesamt elektrisch neutral, da sich die positiven und negativen Ladungen zur Gesamtladung $Q = 0 C$ addieren. Gibt das Atom ein oder mehrere Elektronen ab oder nimmt diese auf, so ist das Atom nach außen hin elektrisch geladen; man spricht von einem Ion. Beispiele für Ionen sind zweifach positiv geladene Ca^{2+} -Ionen oder einfach negativ geladene Cl^{-} -Ionen.

Körper mit gleichem Ladungsvorzeichen stoßen sich ab, zwei Körper mit verschiedenem Ladungsvorzeichen ziehen sich an. Zwischen zwei punktförmigen Ladungen Q_1 und Q_2 wirkt die *Coulombkraft*

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r^2}.$$

Dabei ist $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{As}{Vm}$ die elektrische Feldkonstante und r der Abstand der beiden Ladungen.

Rechenaufgabe 1: Zwei positive Ladungen $Q_1 = 50 \mu C$ und $Q_2 = 1 \mu C$ haben einen Abstand r voneinander. Fertigen Sie eine beschriftete Skizze an und zeichnen Sie die auf die beiden Körper wirkenden Kräfte ein. Welche Ladung übt die größere Kraft aus? Begründen Sie Ihre Antwort mit Hilfe des Coulombgesetzes.

II.2. Spannung und potentielle Energie von Ladungen

Bewegt man eine Ladung Q_1 auf eine andere, fest positionierte Ladung Q_2 gleichen Vorzeichens zu, dann muss man auf dieser Wegstrecke die Coulombkraft überwinden. Man verrichtet also Arbeit und erhöht so die potentielle (elektrische) Energie der Ladung Q_1 . Man legt fest, dass die potentielle (elektrische) Energie unendlich weit entfernt von Q_2 Null ist. Die Erhöhung dieser Energie ist proportional zur Ladungsmenge Q_1 . Dividiert man die potentielle (elektrische) Energie durch Q_1 , so erhält man die zugehörige Proportionalitätskonstante, das *elektrische Potential* φ . Es gibt für jeden Ort an, wieviel Arbeit man pro Ladung gegen die Coulombkraft aufwenden muss, um die Ladung vom Unendlichen zu diesem Ort zu bringen.

Analoge Überlegungen lassen sich auch für Ladungen mit ungleichem Vorzeichen anstellen (Arbeit wird abgegeben, potentielle (elektrische) Energie nimmt ab.).

Möchte man nun Q_1 vom Ort A zum Ort B bewegen, so gilt für die aufzuwendende/abgegebene Arbeit:

$$W = \Delta E_{\text{pot,el.}} = E_{\text{pot,el., B}} - E_{\text{pot,el., A}}$$

und damit bei Division durch Q_1 für das Potential:

$$\Delta\varphi = \varphi(B) - \varphi(A)$$

Diese Potentialdifferenz wird als *elektrische Spannung* U zwischen den Punkten A und B bezeichnet. Sie ist eine zentrale Größe der Elektrizitätslehre, ihre Einheit ist Volt (V).

Bewegt sich eine Ladung Q über eine Strecke mit der Potentialdifferenz (Spannung) U , so ändert sich also ihre potentielle (elektrische) Energie E und es gilt $\Delta E = Q \cdot U$.

Beispiel:

Im Intra- und Extrazellulärraum einer Nervenzelle liegen Ionen in unterschiedlicher Konzentration vor. Dieser Unterschied macht sich als Spannung von $U \approx -70 mV$ bemerkbar. Die Bezeichnung Membranpotential ist dabei physikalisch nicht ganz korrekt, da es sich um eine Potentialdifferenz handelt.

In der medizinischen Literatur wird statt des Buchstaben U häufig ein V für das Membranpotential und z.B. E_K für das Gleichgewichtspotential (Equilibrium) von Kalium-Ionen verwendet.

Rechenaufgabe 2: Ein Elektron wird am Ort A in der Nähe einer negativen Ladung festgehalten. Das Elektron nimmt die Bewegungsenergie $E_{\text{kin}} = 1,94 \cdot 10^{-15}$ J auf, wenn es freigelassen wird. Wie groß ist dabei die auf das Elektron verrichtete Arbeit pro Ladung (oder das Potential ϕ_A), um das Elektron vom Unendlichen an Ort A zu bringen.

II.3. Elektrische Stromstärke

Unter dem elektrischen *Strom* versteht man einen Ladungstransport vom Ort A zum Ort B. Die *Stromstärke* I gibt an, welche Ladungsmenge ΔQ pro Zeitabschnitt Δt einen Leiterquerschnitt passiert. Ihre Einheit ist Ampere (A):

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \tag{1}$$

Allgemein gilt unter Verwendung der Ableitung:

$$I = \frac{dQ}{dt} \tag{2}$$

Die Stromstärke ist eine Basisgröße im SI-System, damit ist die Ladung eigentlich eine abgeleitete Größe.

Hintergrundinformation: Die Ladung, die pro Zeitintervall durch die Querschnittfläche fließt, kann mit Hilfe der Ladungsdichte ρ ausgedrückt werden¹: $\Delta Q = \rho \cdot \Delta V$. Das Volumen ΔV , das pro Zeitintervall Δt durch die Querschnittfläche A des Leiters fließt, ist $\Delta V = A \cdot \Delta l$. $\Delta l = v \cdot \Delta t$ ist hier die Strecke, die die Ladungsträger im Zeitintervall Δt mit ihrer *Driftgeschwindigkeit* v zurücklegen. Diese liegt bei ca. $v = 10^{-4}$ m/s.

Jetzt lässt sich die *elektrische Stromdichte* j aus der Stromstärke I und der Querschnittfläche A des Leiters so berechnen:

$$j = \frac{I}{A} = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \frac{1}{A} = \frac{\rho \cdot A \cdot v \cdot \Delta t}{\Delta t} \frac{1}{A} = \rho \cdot v.$$

Rechenaufgabe 3: Ein elektrischer Widerstand ist an einer Spannungsquelle mit der Spannung 4,5 V angeschlossen. Es fließt für 10 min ein elektrischer Strom der Stromstärke 0,1 A. Wie viele Elektronen werden dabei transportiert?

II.4. Elektrischer Widerstand

1. Grundlagen

Der *elektrische Widerstand* R ist definiert als Quotient aus Spannung U und Stromstärke I :

$$R = \frac{U}{I} \text{ mit } [R] = \frac{\text{V}}{\text{A}} = \Omega(\text{Ohm}). \tag{3}$$

¹ Bitte verwechseln Sie die Ladungsdichte nicht mit der Massendichte und mit dem spezifischen Widerstand im nächsten Abschnitt. Leider ist es üblich, alle drei Größen mit ρ zu bezeichnen.

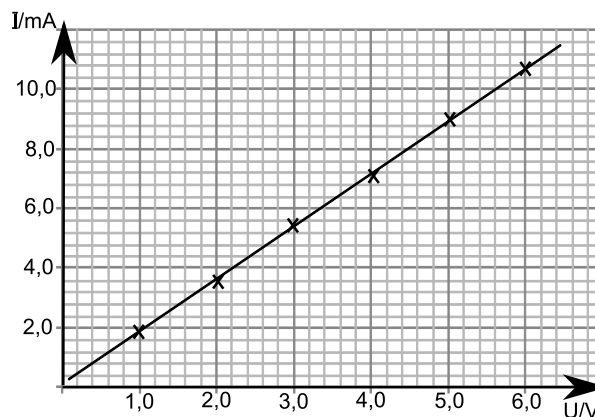


Abb. 1: U-I-Kennlinie eines Ohmschen Widerstands.

Manchmal ist es einfacher, statt des elektrischen Widerstands seinen Kehrwert $G = \frac{1}{R}$ zu verwenden. Er heißt *Leitwert*, seine Einheit ist S (Siemens) = $\frac{1}{\Omega}$.

Das Wort Widerstand hat zwei Bedeutungen. Einerseits ist die physikalische Größe elektrischer Widerstand gemeint. Andererseits ist ein Widerstand ein elektrisches Bauteil, das einen elektrischen Widerstand besitzt.

Liegt an einem Widerstand R eine Spannung U an, so fließt durch ihn ein Strom der Stärke I :

$$I = \frac{U}{R} \tag{4}$$

Fließt durch einen Widerstand R ein Strom der Stärke I , so kann man an den Enden des Widerstands die Spannung U messen:

$$U = R \cdot I \tag{5}$$

Man spricht auch von Spannungsabfall bzw. davon, dass die Spannung U am Widerstand R abfällt.

2. Ohmsches Gesetz

Wenn U und I proportional sind, ist Ihr Quotient, der Widerstand $R = U/I$, konstant. Dies ist das *Ohmsche Gesetz*. Derartige Widerstände nennt man *Ohmsche Widerstände*. Insbesondere sind die im Versuch verwendeten Widerstände Ohmsch. Trägt man U gegen I auf (U - I -Kennlinie), so erhält man hier eine Ursprungsgerade (vgl. Abb. 1). Dies ist ein Charakteristikum eines Ohmschen Widerstands.

3. Spezifischer Widerstand

Der Widerstand eines elektrischen Leiters (z.B. eines dünnen Drahts) kommt durch die Wechselwirkung der fließenden Ladungen mit den Atomen des Metalls zustande. Er hängt von der Geometrie des Leiters ab.

Entscheidend sind sein Material, seine Länge l und seine Querschnittsfläche A .

- Bei konstanter Querschnittsfläche gibt es mehr wechselwirkende Atome auf dem Weg der Elektronen. Mit zunehmender Länge des Leiters wird sein Widerstand größer. Es gilt: $R \sim l$.
- Bei konstanter Länge kommen umso mehr Elektronen durch den Leiterquerschnitt, je größer dieser ist. Mit zunehmendem Querschnitt des Leiters wird sein Widerstand kleiner. Es gilt: $R \sim \frac{1}{A}$.

Zusammengefasst ergibt sich $R \sim \frac{l}{A}$ und damit folgende Formel:

$$R = \rho \cdot \frac{l}{A} \text{ mit } [\rho] = \Omega \cdot \text{m}. \quad (6)$$

Die Proportionalitätskonstante ρ heißt *spezifischer Widerstand*.

Der Kehrwert der spezifischen Widerstands heißt *elektrische Leitfähigkeit* $\sigma = \frac{1}{\rho}$, $[\sigma] = \frac{1}{\Omega \cdot \text{m}} = \frac{\text{S}}{\text{m}}$. ρ und σ sind Materialkonstanten.

Beispiel:

Das Innere einer langgezogenen zylindrischen Nervenzelle (z.B. Dendrit oder Axon) ist mit einem elektrischen Leiter vergleichbar. Daher haben solche Nervenbahnen mit einem sehr kleinen Durchmesser einen sehr großen Innenwiderstand, während dieser z.B. beim Riesenaxon eines Tintenfischs sehr klein ist. Der Extrazellulärraum ist hingegen weit ausgedehnt, so dass dessen elektrischer Widerstand sehr klein ist.

II.5. Elektrische Leistung

Leistung P ist Arbeit pro Zeit:

$$P = \frac{dW}{dt}, \text{ mit } [P] = \frac{\text{J}}{\text{s}} = \text{W (Watt)} \quad (7)$$

Ungünstigerweise ist es üblich, die Arbeit und die Einheit der Leistung beide mit W abzukürzen.

In dem Fall der elektrischen Energie oder Arbeit folgt aus $E = Q \cdot U = I \cdot t \cdot U = U \cdot I \cdot t$:

$$P = U \cdot I, \text{ mit } [P] = \text{V} \cdot \text{A} = \text{W}. \quad (8)$$

Bei einem Strom I durch einen Widerstand R bzw. einer Spannung U am Widerstand R wird die Leistung mit Hilfe des Ohmschen Gesetzes wie folgt ausgedrückt:

$$P = R \cdot I^2 \text{ bzw. } P = \frac{U^2}{R} \quad (9)$$

Rechenaufgabe 4: In einer Gewebekultur schnell wachsender Tumorzellen wurden durch das Anlegen hoher Spannungen Tumorzellen zerstört. Hierbei wurden mit Hilfe von Elektroden 200 Stromstöße bei einer Spannung von 5 kV für jeweils 10 μs angelegt. Es floss jeweils ein Strom von 10 A. Wie groß war die Energie, die dem Gewebe zugeführt wurde?

II.6. Elektrische Schaltungen

Elektrische Schaltungen werden üblicherweise durch Schaltbilder beschrieben. Dabei werden die verschiedenen Bauteile durch Symbole und die Verbindungskabel oder Leitungen durch Linien dargestellt. Eine kleine Auswahl solcher Symbole findet sich in Abb. 2, Beispiele für Schaltbilder folgen in den nächsten Abschnitten. Die *technische Stromrichtung* wurde vom Pluspol zum Minuspol festgelegt, bevor man wusste, dass sich in metallischen Leitern eigentlich Elektronen in die andere Richtung bewegen.







Gleichspannungsquelle		Widerstand		Leitungskreuzung nicht leitend	
Multimeter Messgröße X		Kondensator		Leitungskreuzung leitend	

Abb. 2: Symbole für Bauteile eines Stromkreises.

1. Die Kirchhoffschen Regeln (Gesetze)

Um bei Schaltungen aus mehreren Elementen die Größen U, I, P, \dots berechnen zu können, helfen die beiden Kirchhoffschen Gesetze:

- **1. Kirchhoffsches Gesetz: Knotenregel**
In jedem Verzweigungspunkt (Knoten) ist die Summe der zufließenden Ströme gleich der Summe der abfließenden Ströme (Ladungserhaltung).
- **2. Kirchhoffsches Gesetz: Maschenregel**
In jedem geschlossenen Teilkreis (Masche) einer elektrischen Schaltung ist die Summe der Spannungen aus Spannungsquellen gleich der Summe der Spannungsabfälle (Energieerhaltung).

2. Gesamtwiderstand einer Parallelschaltung

In Abb. 3 sind zwei Widerstände parallel geschaltet. Für die Ströme I_1 und I_2 gilt nach der Knotenregel:

$$I_{\text{ges}} = I_1 + I_2. \quad (10)$$

Zwischen den beiden Knoten in Abb. 3 liegt die Spannung U_{ges} an. Daher sind die an den beiden Widerständen abfallenden Spannungen gleich groß:

$$U_1 = U_2 = U_{\text{ges}}$$

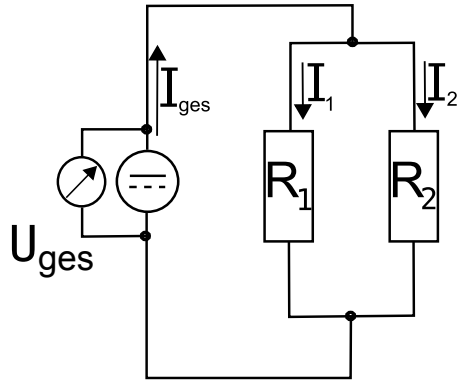


Abb. 3: Parallelschaltung von zwei Widerständen.

Diese Spannung bezeichnen wir im Folgenden mit U .
Nach Gleichung 4 gilt:

$$I_1 = \frac{U}{R_1} \text{ und } I_2 = \frac{U}{R_2}$$

Die Ströme teilen sich an einem Knoten reziprok zu den Widerständen auf. Durch große Widerstände fließt wenig, durch kleine viel Strom.

$$\stackrel{(10)}{\Rightarrow} I_{\text{ges}} = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} = U \cdot \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$$

Die beiden Widerstände R_1 und R_2 haben parallel geschaltet einen Gesamtwiderstand $R_{\text{ges}} = \frac{U_{\text{ges}}}{I_{\text{ges}}}$.

Damit ist mit $I_{\text{ges}} = \frac{U}{R_{\text{ges}}}$:

$$\frac{U}{R_{\text{ges}}} = U \cdot \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$$

Dividiert man beide Seiten durch U , so erhält man:

$$\frac{1}{R_{\text{ges}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \tag{11}$$

Analog gilt für eine Parallelschaltung von mehr Widerständen:

$$\frac{1}{R_{\text{ges}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots \tag{12}$$

Allgemein in Worten: In Parallelschaltungen addieren sich die Kehrwerte der Einzelwiderstände zum Kehrwert des Gesamtwiderstands.

Verwendet man den Leitwert, vereinfacht sich Gleichung 12 zu:

$$G_{\text{ges}} = G_1 + G_2 + \dots$$

Beispiel:

An den Ranvierschen Schnürringen ist die Anzahl der Ionenkanäle stark erhöht. Jeder Ionenkanal hat einen Widerstand, es handelt sich also physikalisch um eine Parallelschaltung vieler Widerstände. Die hohe Anzahl führt zu einer Erhöhung der Leitfähigkeit bzw. einer

Senkung des Membranwiderstands im Vergleich zu wenigen Ionenkanälen außerhalb der Ranvierschen Schnürringe.

3. Gesamtwiderstand einer Reihenschaltung

In Abb. 4 sind zwei Widerstände R_1 und R_2 in Reihe, also hintereinander geschaltet.

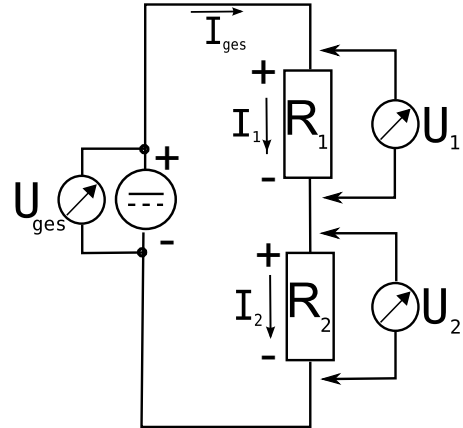


Abb. 4: Reihenschaltung von zwei Widerständen. U_1 ist der Spannungsabfall am Widerstand R_1 und U_2 ist der Spannungsabfall am Widerstand R_2 .

Für die Spannungen U_1 und U_2 gilt nach der Maschenregel:

$$U_{\text{ges}} = U_1 + U_2. \tag{13}$$

Überall im Stromkreis fließt derselbe Strom mit Stromstärke I_{ges} . Daher sind die Ströme durch beide Widerstände gleich groß:

$$I_1 = I_2 = I_{\text{ges}}$$

Diese Stromstärke bezeichnen wir im Folgenden mit I .
Nach Gleichung 5 gilt:

$$U_1 = R_1 \cdot I \text{ und } U_2 = R_2 \cdot I$$

Die Spannungen teilen sich in einer Masche wie die Widerstände auf. An großen Widerständen fällt viel Spannung ab, an kleinen wenig.

$$\stackrel{(13)}{\Rightarrow} U_{\text{ges}} = R_1 \cdot I + R_2 \cdot I = (R_1 + R_2) \cdot I$$

Die beiden Widerstände R_1 und R_2 haben in Reihe geschaltet einen Gesamtwiderstand $R_{\text{ges}} = \frac{U_{\text{ges}}}{I_{\text{ges}}}$.

Damit ist mit $U_{\text{ges}} = R_{\text{ges}} \cdot I$:

$$R_{\text{ges}} \cdot I = (R_1 + R_2) \cdot I$$

Dividiert man beide Seiten durch I , so erhält man:

$$R_{\text{ges}} = R_1 + R_2 \tag{14}$$

Analog gilt für eine Reihenschaltung von mehr Widerständen:

$$R_{ges} = R_1 + R_2 + R_3 + \dots \quad (15)$$

Allgemein in Worten: In Reihenschaltungen addieren sich die Einzelwiderstände zum Gesamtwiderstand.

4. Kombination von Parallel- und Reihenschaltung

Kombiniert man Parallel- und Reihenschaltungen, so bestimmt man die Gesamtwiderstände der einzelnen Schaltungen von „innen nach außen“. Dies soll anhand von zwei Beispielen verdeutlicht werden:

1. Innen Parallelschaltung, außen Reihenschaltung

In Abbildung 5 sind die Widerstände R_2 und R_3

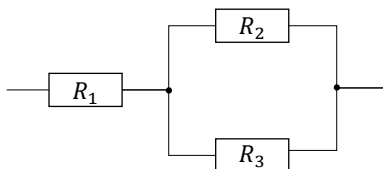


Abb. 5: Kombination 1 von Parallel- und Reihenschaltung von Widerständen.

parallel geschaltet. Diese Parallelschaltung ist in Reihe zum Widerstand R_1 geschaltet. Mit Gleichung 11 erhält man für den Gesamtwiderstand der Parallelschaltung:

$$\frac{1}{R_{ges\ 2,3}} = \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} = \frac{R_2 + R_3}{R_2 \cdot R_3}$$

und damit:

$$R_{ges\ 2,3} = \frac{R_2 \cdot R_3}{R_2 + R_3}$$

Dieser Gesamtwiderstand von R_2 und R_3 ist mit R_1 in Reihe geschaltet. Nach Gleichung 14 gilt damit für den Gesamtwiderstand von R_1 , R_2 und R_3 :

$$R_{ges\ 1, 2, 3} = R_1 + R_{ges\ 2, 3} = R_1 + \frac{R_2 \cdot R_3}{R_2 + R_3}$$

2. Innen Reihenschaltung, außen Parallelschaltung

In Abbildung 6 sind die Widerstände R_1 und R_2 in Reihe geschaltet. Diese Reihenschaltung ist parallel zum Widerstand R_3 geschaltet. Mit Gleichung 14 erhält man für den Gesamtwiderstand der Reihenschaltung:

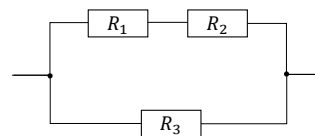


Abb. 6: Kombination 2 von Parallel- und Reihenschaltung von Widerständen.

$$R_{ges\ 1, 2} = R_1 + R_2$$

Dieser Gesamtwiderstand von R_1 und R_2 ist mit R_3 parallel geschaltet. Nach Gleichung 11 gilt damit für den Gesamtwiderstand von R_1 , R_2 und R_3 :

$$\frac{1}{R_{ges\ 1, 2, 3}} = \frac{1}{R_{ges\ 1, 2}} + \frac{1}{R_3} = \frac{1}{R_1 + R_2} + \frac{1}{R_3} = \frac{R_1 + R_2 + R_3}{(R_1 + R_2) \cdot R_3}$$

und damit:

$$R_{ges\ 1,2,3} = \frac{(R_1 + R_2) \cdot R_3}{R_1 + R_2 + R_3}$$

Rechenaufgabe 5: In Abb. 7 sind $R_1 = 10 \Omega$, $R_2 = 20 \Omega$, $R_3 = 15 \Omega$ und $U = 12 \text{ V}$. Der Innenwiderstand der Quelle R_V ist seriell zur Quelle geschaltet, aber nicht eingezeichnet, weil $R_V = 0$. Welchen Wert hat die elektrische Stromstärke, die durch den Widerstand R_1 fließt?

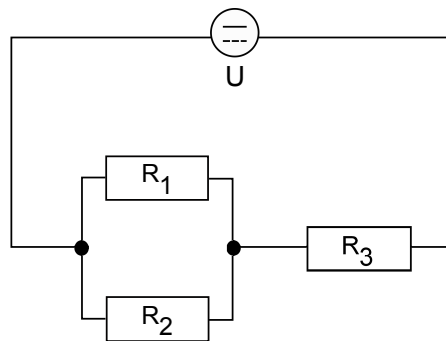


Abb. 7: Schaltkreis mit drei Widerständen

Lösung: R_1 und R_2 sind parallel geschaltet. R_3 ist in Reihe zu R_1 und R_2 geschaltet. Durch R_3 fließt der Gesamtstrom I , durch R_1 der Strom I_1 und durch R_2 der Strom I_2 . An jedem Knotenpunkt (schwarze Punkte) gilt: $I = I_1 + I_2$ (1. Kirchhoffsches Gesetz). Der Gesamtwiderstand R_p der Parallelschaltung von R_1 und R_2 ist:

$$R_p^{-1} = R_1^{-1} + R_2^{-1}.$$

Der Gesamtwiderstand der Schaltung R ist

$$R = R_p + R_3 + R_V = R_p + R_3.$$

Jetzt kann man den Gesamtstrom I mit Hilfe des Ohmschen Ge-

setzes ausrechnen:

$$I = \frac{U}{R} = \frac{U}{R_p + R_3} = \frac{U}{(R_1 R_2)/(R_1 + R_2) + R_3} =$$

$$= \frac{12V}{(10 \Omega \cdot 20 \Omega)/(10 \Omega + 20 \Omega) + 15 \Omega} = 0,55385V/\Omega = 0,55A.$$

Der letzte Schritt ist die Rundung auf 2 signifikante Stellen (siehe AMW).

Um I_1 zu berechnen, benutzen wir das 2. Kirchhoffsche Gesetz für die Masche, welche die beiden Widerstände R_1 und R_2 beinhaltet:

$$I_1 R_1 = I_2 R_2 \Rightarrow I_1 = I_2 R_2 / R_1.$$

Aber $I_1 = I - I_2$ (siehe oben).

$$I_1 = (I - I_1) \cdot R_2 / R_1 \Rightarrow I_1 = \frac{I}{1 + R_1 / R_2}$$

$$I_1 = \frac{0,55385A}{1 + 10 \Omega / 20 \Omega} = 0,36923A = 0,37A$$

Der letzte Schritt ist wieder die Rundung auf 2 signifikante Stellen.

Wenn in Abb. 7 der Widerstand R_2 ein Voltmeter mit Innenwiderstand R_i repräsentiert, dann misst das Voltmeter den Spannungsabfall am Widerstand R_1 . Je größer R_2 ist, desto kleiner wird der Strom durch das Voltmeter sein und desto genauer die Messung.

II.7. Messung von Stromstärke, Spannung und Widerstand

Mit einem modernen Multimeter kann die Stromstärke, die Spannung oder auch der Widerstand gemessen werden. Da bei jedem Messvorgang stets ein Teilstrom durch das Multimeter fließt, muss das Gerät je nach Verwendungszweck unterschiedlich eingestellt und angeschlossen werden. Wichtig ist, dass der eigentliche Stromkreis durch das Anschließen des Messgeräts möglichst wenig beeinflusst wird.

1. *Stromstärkemessung mit dem Amperemeter*

Um die Stromstärke an einer Stelle des Stromkreises zu messen, müssen alle Elektronen auch durch das als Amperemeter verwendete Multimeter fließen. Deshalb wird das Gerät in Reihe eingebaut (Abb. 8). Um den Gesamtstrom möglichst wenig zu verändern, muss der Innenwiderstand R_i des Geräts sehr klein sein.

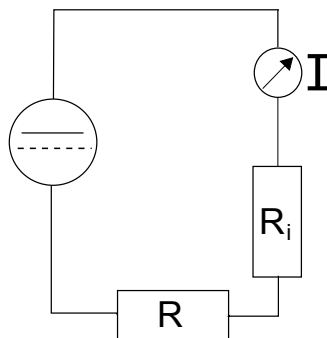


Abb. 8: Messung der Stromstärke I .

2. *Spannungsmessung mit dem Voltmeter*

Zur Messung des Spannungsabfalls an einem Widerstand wird das Voltmeter verwendete Multimeter parallel zum Widerstand geschaltet (vgl. Abb. 9). Der Innenwiderstand R_i des Geräts muss sehr groß sein, so dass nur ein sehr kleiner Strom durch das Voltmeter fließt.

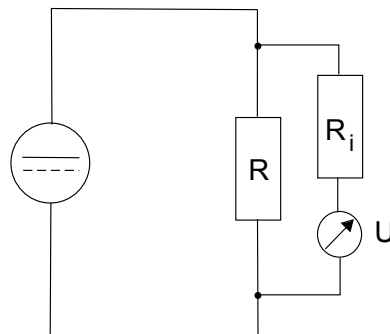


Abb. 9: Messung des Spannungsabfalls U an einem Widerstand.

3. *Widerstandsmessung mit dem Ohmmeter*

Auch der Widerstand eines Bauteils kann mit dem Multimeter bestimmt werden. Das Multimeter wird als Ohmmeter verwendet: Es erzeugt einen bekannten Strom I , misst die am Widerstand abfallende Spannung U und berechnet über $R = U/I$ den Wert des Widerstands. Das Bauteil darf sich dabei nicht in einer elektrischen Schaltung befinden, da dann der Rest der Schaltung parallel zum Widerstand geschaltet wäre und damit das Messergebnis verfälschen würde.

Rechenaufgabe 6: Die Länge L des Internodiums einer Nervenfasern ist 1,2 mm. Das Axon hat näherungsweise einen kreisförmigen Querschnitt mit Innendurchmesser $d = 4,5 \mu\text{m}$. Der spezifische elektrische Widerstand ρ des Materials im Axon beträgt $0,6 \Omega \cdot \text{m}$. Wie gross ist der elektrische Innenwiderstand R_i des Axons über die Länge des Internodiums?

II.8. Spannungsabhängigkeit von Ionenkanälen

Die Membran einer Nervenzelle trennt die Ionen, die sich im Intra- und Extrazellulärraum befinden. Ein Ladungsaustausch ist nur durch die in der Membran eingelagerten Ionenkanäle möglich. Im Ruhezustand herrscht zwischen Innen- und Außenseite der Membran einer Nervenzelle eine Potentialdifferenz von $U \approx -70 \text{ mV}$. Diese Spannung wird in der Physiologie auch als Membranpotential bezeichnet. Da sich die Ladungs- und Konzentrationsunterschiede der verschiedenen Ionenarten hier gegenseitig kompensieren, fließt trotz der Potentialdifferenz netto kein Strom durch die Membran. Wenn sich diese Spannung hin zu positiveren Werten verändert (z.B. $U = -30 \text{ mV}$), spricht man von einer Depolarisation, im umgekehrten Fall von einer Repolarisation bzw. Hyperpolarisation. Ein *offener Ionenkanal* verhält sich dabei wie ein ohmscher Widerstand: Solange nur die Ruhespannung von

ca. $U \approx -70$ mV an der Membran anliegt, fließt kein Netto-Strom (vgl. Abb. 10). Wie oben beschrieben, kann der Widerstand eines Ionenkanals durch $R = U/I$ berechnet werden. Korrekterweise müsste in der Formel ΔU stehen, da der Unterschied zum Ruhemembranpotential entscheidend ist.

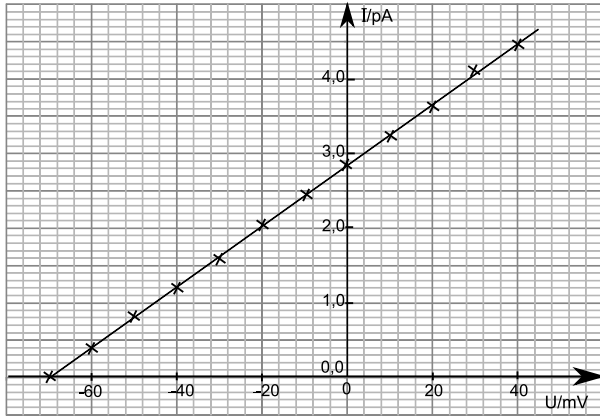


Abb. 10: U - I -Kennlinie eines einzelnen, geöffneten Ionenkanals (Simulation).

Allerdings zeigen Ionenkanäle ein solches Verhalten nur, solange sie geöffnet sind. Wie lange ein solcher Kanal geöffnet bleibt, hängt im Allgemeinen von der anliegenden Spannung ab. Bei diesen *spannungsabhängigen Ionenkanälen* wird der Zeitanteil, für den der Kanal geöffnet ist, durch die *Offenwahrscheinlichkeit* beschrieben.

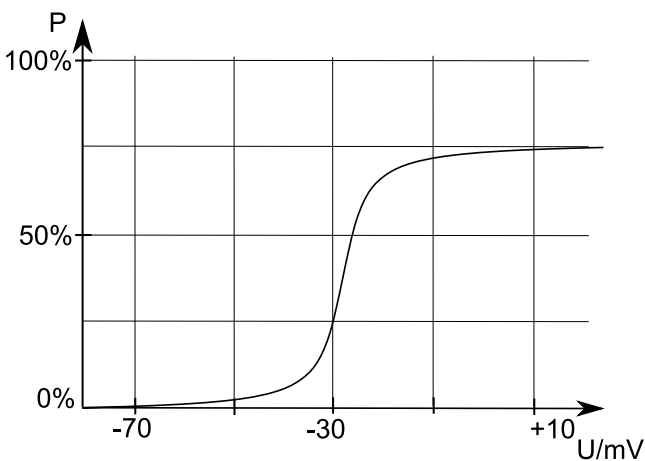


Abb. 11: Offenwahrscheinlichkeit P eines Ionenkanals in Abhängigkeit vom Membranpotential U .

Abb. 11 zeigt diesen Zusammenhang qualitativ für einen Natriumkanal. Man sieht, dass für eine sehr kleine Spannungsänderung der Kanal fast immer geschlossen ist. Erst bei einer Depolarisation, bei der das Membranpotential einen Wert von $U \approx -30$ mV erreicht, nimmt der Zeitanteil des offenen Zustands stark zu. Dies entspricht dem Bereich, in dem eine Nervenzelle ein neues Aktionspotential auslöst, da hier die Leitfähigkeit explosionsartig ansteigt. Für noch größere Depolarisationen geht der Graph in eine Sättigung über, da die Öff-

nungsdauer des Kanals ihr Maximum von 75% bereits erreicht hat.

Um das elektrische Verhalten einer Zellmembran korrekt zu beschreiben, müssen mehrere Ionenkanäle gleichzeitig betrachtet werden. Die Offenwahrscheinlichkeit P macht in diesem Fall eine statistische Aussage darüber, welcher Prozentsatz der Kanäle gerade geöffnet ist².

Abb. 12 zeigt, wie das Verhalten spannungsabhängiger Ionenkanäle experimentell simuliert werden kann. Der betrachtete Membranabschnitt enthält fünf Ionenkanäle, deren Offenwahrscheinlichkeit von der Stärke der Depolarisation abhängt. Dies wird durch eine Parallelschaltung aus verschiedenen vielen, identischen Widerständen R_M simuliert. Jeder dieser Widerstände repräsentiert einen der offenen Ionenkanäle (Abb. 12 Mitte).

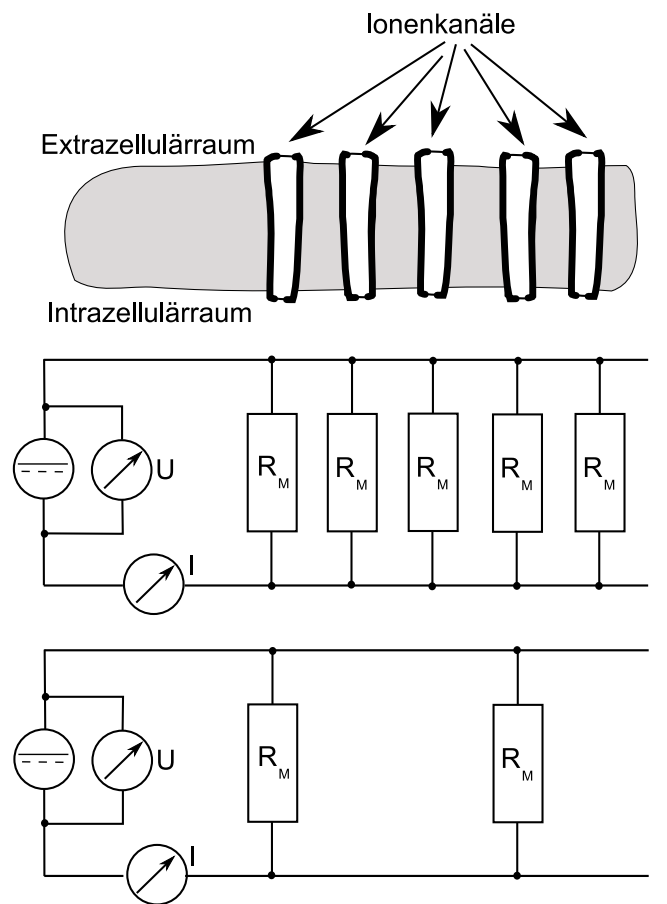


Abb. 12: Oben: Ein Abschnitt einer Membran mit mehreren spannungsabhängigen Ionenkanälen. Mitte: Überschwellige Depolarisation - alle Kanäle sind geöffnet. Unten: Unterschwellige Depolarisation - nur zwei Kanäle sind geöffnet.

Bei einer hohen Spannung, wie bei einer überschwelligen Depolarisation, sind alle Kanäle (hier fünf) geöffnet, so dass die Membran ihre maximale Leitfähigkeit erreicht (Abb. 12 Mitte). Bei einer kleinen Änderung, z.B.

² Offenwahrscheinlichkeit P bitte nicht verwechseln mit der Leistung P .

durch eine unterschwellige Depolarisation, sind nur wenige Ionenkanäle (hier zwei) geöffnet, weshalb die Membran eine geringe Leitfähigkeit aufweist (Abb. 12 unten). Im Experiment wird die Depolarisation durch Anlegen einer regelbaren Spannung und die einzelnen offenen Ionenkanäle durch parallel geschaltete Widerstände simuliert. Um eine U - I -Kennlinie für diese Schaltung aufzunehmen, wird die Anzahl der geschalteten Widerstände der Parallelschaltung abhängig von der anliegenden Spannung U variiert und die entsprechenden Wertepaare aufgenommen (Abb. 13).

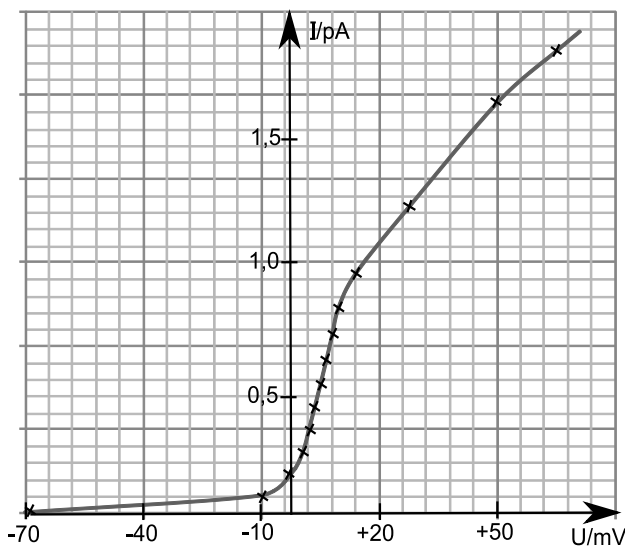


Abb. 13: U - I -Kennlinie eines Membranabschnitts (Simulation).

Bemerkung:

Diese Beschreibung stellt eine starke Vereinfachung dar, da nur eine Ionenart berücksichtigt wird, während im menschlichen Körper mehrere Ionenarten und Ionenkanäle eine Rolle spielen. Mit dem von A. Hodgkin und A. Huxley entwickelten Modell zur Funktionsweise von Neuronen können die oben geschilderten Vorgänge für alle Ionenarten beschrieben werden. Allerdings ist dies nur mit Hilfe von Computern berechenbar.

II.9. Modell für die elektrotonische Erregungsausbreitung

In diesem Abschnitt wird neben dem Membranwiderstand auch der Innenwiderstand einer langen, dünnen Nervenzelle (z.B. Axon oder Dendrit) betrachtet. Allerdings kann im Gegensatz zum vorherigen Kapitel die Spannungsabhängigkeit der Ionenkanäle hier nicht berücksichtigt werden, sondern der Membranwiderstand wird als konstant angenommen. Dies ist für eine Membran, die nur passive Kanäle enthält, das Internodium eines myelinisierten Axons oder allgemein für eine unterschwellige Depolarisation an einem Axon legitim.

Abb. 14 (oben) zeigt einen Schnitt durch eine langge-

zogene, zylinderförmige Nervenzelle. Diese wird physikalisch durch die eingezeichnete elektrische Schaltung beschrieben.

Der Intrazellulärraum einer solchen Nervenzelle kann aufgrund seiner Geometrie mit einem langen, dünnen Leiter verglichen werden. Dies wird quantitativ durch die Innenwiderstände R_i angegeben. Wie bei jedem elektrischen Leiter ist der Widerstand proportional zur Länge und indirekt proportional zur Querschnittsfläche. Im Gegensatz zum Inneren der Zelle besitzt der Extrazellulärraum keine direkten Begrenzungen, so dass sich die Ionen dort relativ frei bewegen können. Der Widerstand ist deshalb vernachlässigbar klein und wird durch einen widerstandslosen Leiter simuliert. Die Stromstärke durch die Membran variiert je nach Zustand und Anzahl der Kanäle. Dies wird durch die *Membranwiderstände* R_M beschrieben.

Die Membran hat zusätzlich Eigenschaften eines Kondensators. Diese werden gesondert im Versuch SIG behandelt.

Im Ruhezustand ist das Membranpotential entlang der Membran zunächst überall gleich. Eine Depolarisation, wie sie z.B. bei Reizung sensorischer Nervenzellen erfolgt, breitet sich infolge der frei beweglichen Ionen entlang der Nervenzelle aus. Solange keine aktive Verstärkung des Signals erfolgt, spricht man von passiver oder *elektrotonischer Erregungsausbreitung*.

Die elektrotonische Erregungsausbreitung wird durch zwei Größen charakterisiert:

- Wie schnell breitet sich die Erregung aus? Dies gibt die *Membranzeitkonstante* τ an, vgl. Versuch SIG.
- Wie weit kann sich die Erregung entlang der Nervenzelle ausbreiten? Dies wird mit Hilfe der *Längskonstante* λ ausgedrückt.

Anhand der Schaltung in Abb. 14 (oben) lässt sich die Abhängigkeit zwischen der an der Membran abfallenden Spannung U und dem Abstand x zum Ursprung der Depolarisation untersuchen.

- Die verwendete Spannungsquelle (links) verschiebt das Membranpotential und erzeugt einen Strom. Dies entspricht der Depolarisation. Durch die im Experiment verwendete Gleichspannungsquelle wird eine zeitliche Veränderung der Depolarisation vernachlässigt. Man hält so eine Momentaufnahme fest, der Zustand ist „eingefroren“.
- Für den verschwindend geringen Widerstand des Extrazellulärraums werden einfache Leitungen, für Innen- und Membranwiderstand die Bauteile R_i und R_M verwendet.
- Jeder Abschnitt (oder jedes Glied) des Schaltbildes besteht aus einem Innen- und einem Membranwiderstand. Dies entspricht in der Physiologie einem kurzen Abschnitt einer Zellmembran.

Die Depolarisation führt zu einem Strom im Inneren der Nervenzelle, im Bild von links nach rechts. Wie

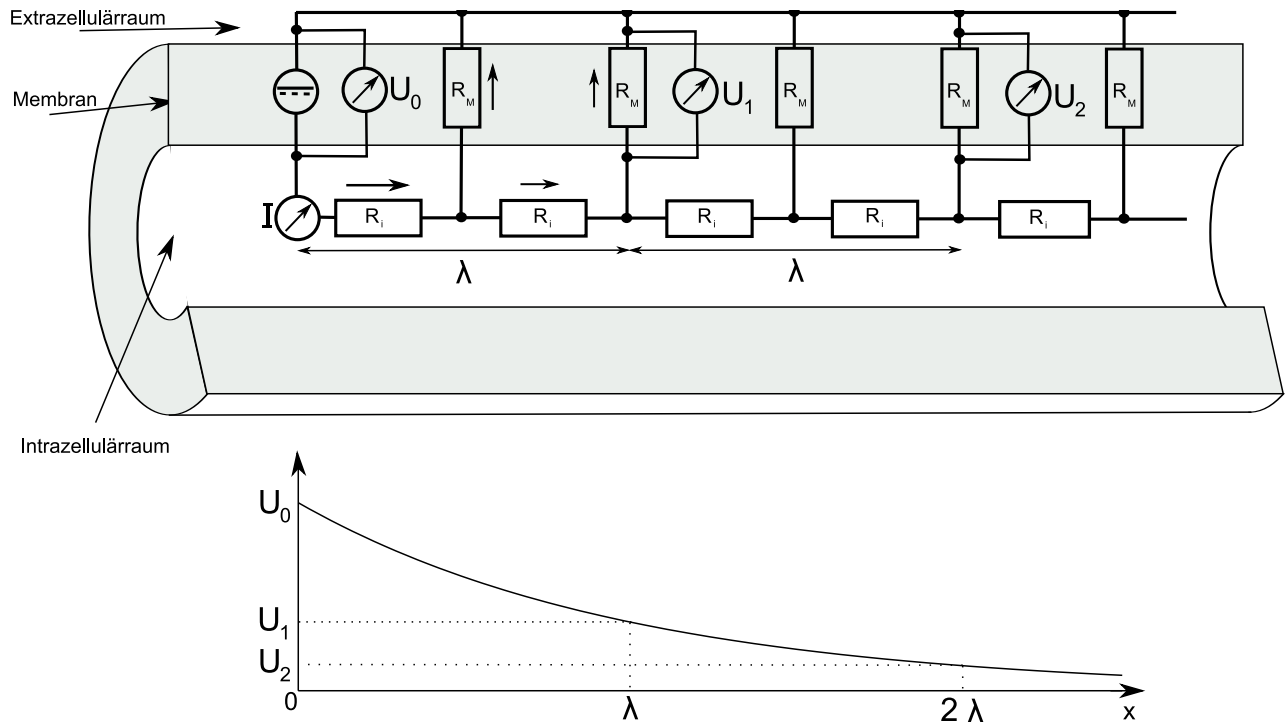


Abb. 14: Elektrotonische Erregungsausbreitung an einer langen dünnen Zelle: Oben: Schnitt durch eine zylinderförmige Nervenzelle mit physikalischem Ersatzschaltbild. Unten: Abhängigkeit der Depolarisation U vom Abstand x zur Stromelektrode.

groß dieser Strom ist, hängt u.a. vom Innenwiderstand R_i ab. Ein Teil des Stroms fließt jeweils am Ende eines Abschnitts durch die Ionenkanäle der Membran und über den Extrazellulärraum zurück. Die Stärke dieser Leckströme hängt dabei vom Membranwiderstand R_M ab. Aufgrund der Leckströme durch die Membran nimmt der Strom im Intrazellulärraum ab. Deshalb nehmen auch die Verlustströme durch die Membran mit der Länge der Nervenfaser ab. Wegen $U = R_M \cdot I$ nehmen auch die an den einzelnen Membranwiderständen R_M abfallenden Spannungen ab.

Die Abnahme der Depolarisation lässt sich wie folgt beschreiben (vgl. Abb. 14 unten, ohne Herleitung):

$$U(x) = U_0 \cdot e^{-x/\lambda} \quad (16)$$

Die Spannung U_0 entspricht dabei der maximalen Depolarisation an der Membran am Ort $x = 0$. Nach der Strecke $x = \lambda$ ist die Spannung auf $1/e = 37\%$ ihres Ausgangswerts abgesunken. Die Längskonstante λ ist also ein Maß dafür, wie stark die Depolarisation U mit der Länge x abklingt. Die Bauteile und Messpositionen sind in Abb. 14 der Einfachheit halber so gewählt, dass zwei Glieder der Schaltung - jeweils bestehend aus einem Membranwiderstand und einem Innenwiderstand - genau einem Membranabschnitt der Länge λ entsprechen.

Rechenaufgabe 7: Die Längskonstante einer Nervenzelle ist $\lambda = 1 \cdot 10^{-3}$ mm. Nach welcher Strecke wird die Membranspannung auf 10% des Ursprungswerts abfallen?

II.10. Weitere physiologische Anwendungen

Eine dicke Nervenfasern hat aufgrund der großen Querschnittsfläche einen kleinen Innenwiderstand. Dadurch fließt im Inneren der Nervenzelle ein großer Strom, der - verglichen mit dünneren Nervenfasern - ein größeres λ aufweist und damit bezogen auf die Länge langsamer abklingt. Dadurch kann sich die Erregung weiter ausbreiten, bevor sie durch ein Aktionspotential erneuert werden muss.

Im Zusammenhang mit „Saltatorischer Erregungsleitung“ wird häufig davon gesprochen, dass das Signal von Schnürring zu Schnürring springt. Diese Begrifflichkeit ist aber irreführend, da Ladungen nicht springen können. Bei kontinuierlicher Erregungsfortleitung am unmyelinisierten Axon müssen in sehr kurzen Abständen neue Aktionspotentiale erzeugt werden, da die Depolarisation stets sehr schnell abklingt und unterschwellig wird. Das Myelin in den Internodien verhindert dies: Nachdem am Ranvierschen Schnürring ein Aktionspotential erzeugt wurde, breitet sich dieses in den Internodien eines myelinisierten Axons elektrotonisch aus. Das Myelin erhöht den Membranwiderstand sehr stark und senkt dadurch die Verlustströme durch die Membran. Deshalb sinkt die Depolarisation entlang des Internodiums nur sehr wenig ab - ein sehr großer Wert für λ ist die Folge - und erreicht überschwellig den nächsten Ranvierschen Schnürring, an dem ein neues Aktionspotential ausgelöst wird. Daher muss das Aktionspotential sehr viel seltener erneuert werden als bei kontinuierlicher Erregungsausbreitung. Dieser vergrößerte Abstand zwischen den Orten am Axon, an denen ein Aktionspotential gebildet wird, wird unglücklicherweise als „sprin-

gendes“ Signal beschrieben.
 Bei Multipler Sklerose wird das Myelin zerstört, so dass die Depolarisation schneller als gewöhnlich abklingt. Dies kann dazu führen, dass das Signal unterschwellig wird, bevor es den nächsten Schnürring erreicht, und deshalb kein neues Aktionspotential mehr ausgelöst wird. Die Erregungsleitung kommt zum Erliegen.

III. TECHNISCHE GRUNDLAGEN

Abb. 15 zeigt eines der im Versuch verwendeten Multimeter. Je nach Verwendung unterscheiden sich Einstellung und Anschlüsse des Gerätes.

- Um das Gerät richtig anzuschließen, wird stets ein Kabel mit der **COM**-Buchse verbunden. Das andere Kabel stecken Sie zur Spannungs- oder Widerstandsmessung in die mit **V** gekennzeichnete Buchse. Zur Strommessung verwenden Sie die linke, mit **10 A** beschriftete Buchse.
- Die Auswahl der Messgröße erfolgt über den Drehregler in der Mitte. Hierbei ist zu unterscheiden, ob Gleich- oder Wechselspannung bzw. -strom gemessen werden soll. Das Display des abgebildeten Geräts zeigt 9.752 VDC an. Dies steht für 9,752 Volt (V) Gleichspannung (DC). Bei der Strommessung kann anhand des Drehreglers nicht direkt zwischen Gleich- und Wechselströmen unterschieden werden. Diese Auswahl erfolgt über das Menü des Geräts (einmal F1, dann F2 drücken).

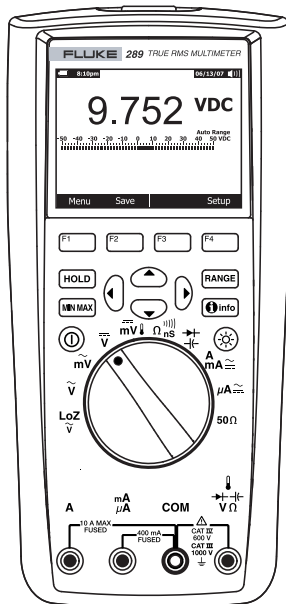


Abb. 15: Multimeter zur Messung von Stromstärke, Spannung und Widerstand (mit freundlicher Genehmigung von www.fluke.de).

Im ersten Versuchsteil untersuchen Sie die geometrischen Abhängigkeiten des elektrischen Widerstands metallischer Leiter. In der in Abb. 16 dargestellten Box

sind vier Drähte mit unterschiedlichen Längen und Durchmessern eingebaut. Über die angelöteten Buchsen können die Widerstände der Drähte mit dem Multimeter bestimmt werden.

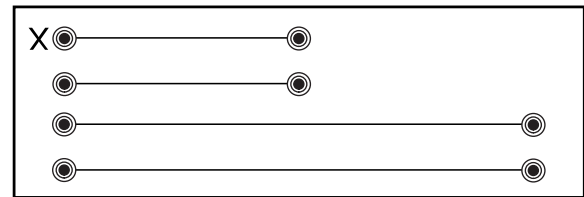


Abb. 16: Metallische Drähte mit unterschiedlichen Längen und Durchmessern.

In den weiteren Teilversuchen wird das in Abb. 17 dargestellte Gerät als Spannungsquelle verwendet. Im mittleren Bereich des Geräts finden sich neben den beiden Anschlüssen + und - zwei Drehregler für Strom und Spannung. Üblicherweise wird der rechte Regler zur Strombegrenzung verwendet und die Spannung mit dem linken Regler eingestellt. Da das Gerät maximal 2A liefert, sollte der Stromregler auf 300 mA eingestellt werden. Um das zu erreichen, dreht man beide Regler vorerst bis zum Anschlag nach links, dann stellt man eine geringe Spannung ein, danach verbindet man beide Buchsen mit einem Kabel („Kurzschluß“) und erhöht vorsichtig den Strom, bis der gewünschte Wert für die Strombegrenzung erreicht ist. Das Display (links im Bild) hilft beim Einstellen der Spannung (zur Anzeige der Stromstärke muss der Anzeigemodus mittels des Druckknopfs geändert werden). Diese Anzeige dient jedoch nur zur Orientierung, der exakte Wert sollte stets mit dem Multimeter gemessen werden.

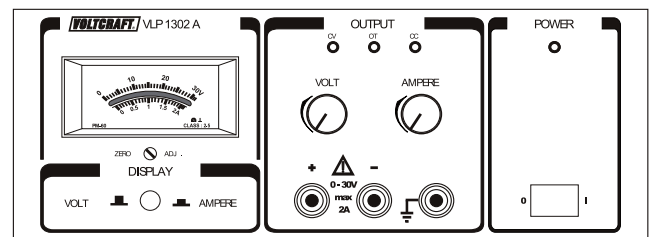


Abb. 17: Die im Versuch verwendete Spannungsquelle (mit freundlicher Genehmigung von www.conrad.de).

In diesem Versuch werden Rastersteckplatten wie in Abb. 18 verwendet. Diese bestehen aus einzelnen quadratischen Kupferplatten (in der Abbildung grau hinterlegt). Alle Buchsen einer solchen Platte sind miteinander leitend verbunden. Um zwei solcher Platten zu verbinden, werden kleine schwarze Kurzschlussstecker (KS, $R \approx 0 \Omega$) oder Widerstände (R) verwendet. Der Anschluss der Spannungsquelle (SQ) bzw. der Multimeter erfolgt mit den roten und schwarzen Messkabeln. An ihrem Arbeitsplatz befinden sich auch zwei Messspitzen. Diese können Sie zur Verlängerung der Kabel verwenden, um leichter messen zu können.

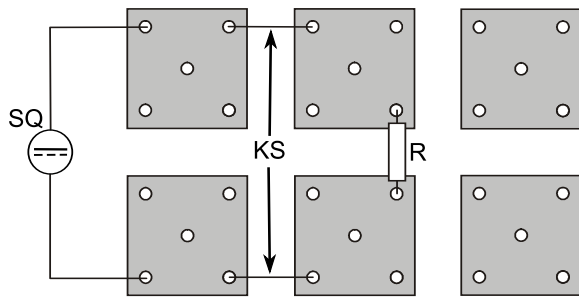


Abb. 18: Ein Abschnitt der im Versuch verwendeten Rastersteckplatte mit einer einfachen Schaltung.

IV. VERSUCHSDURCHFÜHRUNG

IV.1. Elektrischer Widerstand von metallischen Leitern

1. Kurzbeschreibung

Sie erlernen die Handhabung eines Multimeters und überprüfen die Abhängigkeiten des elektrischen Widerstands eines metallischen Leiters von seinen geometrischen Eigenschaften. Sie messen mehrere Körperwiderstände.

2. Messwerte und Durchführung

Bei diesem Versuch sind keine Unsicherheiten zu beachten.

- Stecken Sie zwei Verbindungskabel an einer Stelle zusammen und verbinden Sie die beiden freien Stecker mit dem Ohmmeter. Messen Sie den elektrischen Widerstand.
- In der Aluminiumbox befinden sich vier Metalldrähte mit unterschiedlichen Längen und Querschnittflächen. Die Metalldrähte haben eine Länge von $l_{\text{kurz}} = 25 \text{ cm}$ bzw. $l_{\text{lang}} = 50 \text{ cm}$ und bestehen alle aus demselben Material. Die Querschnittfläche des mit X gekennzeichneten Drahts dient im Folgenden als Vergleichswert und wird mit A_X bezeichnet.
- Verbinden Sie das Multimeter mit den beiden Buchsen eines Metalldrahts. Messen Sie so den elektrischen Widerstand jedes der vier Drähte.
- Messen Sie die Körperwiderstände von Ihnen und Ihrer Partnerin/Ihrem Partner. Nehmen Sie dazu die freien Bananenstecker Ihrer Messkabel fest zwischen Daumen und Zeigefinger Ihrer Hände (sowohl mit feuchten als auch mit trockenen Fingern). Notieren Sie ungefähre Widerstandswerte - Sie sollen nur eine Vorstellung von der Größenordnung bekommen. Der Wert schwankt sowohl je nach Fingerdruck als auch von Person zu Person erheblich. Der Mensch ist kein homogener Leiter, weder räumlich noch zeitlich.

IV.2. Ohmscher Widerstand

1. Kurzbeschreibung

Sie nehmen eine I - U -Kennlinie auf und bestätigen das Ohmsche Gesetz für den verwendeten Widerstand.

2. Messwerte und Durchführung

Anmerkung: Die Bauteile müssen nicht bis zum Anschlag in die Rastersteckplatte gesteckt werden!

- Bauen Sie zunächst auf der Rastersteckplatte einen einfachen Stromkreis, bestehend aus einer Spannungsquelle und einem Widerstand $R_M = 390 \Omega$, auf (vgl. dazu auch Abb. 18).
- Schließen Sie eines der Multimeter parallel am Widerstand an, um die dort abfallende Spannung bestimmen zu können.
- Zur Strommessung schließen Sie das andere Multimeter in Reihe an, indem Sie z.B. eines der Kabel, welches Spannungsquelle und Rastersteckplatte verbindet, durch einen „Umweg“ durchs Amperemeter verlängern.
- Achten Sie jeweils auf die Verwendung der richtigen Anschlüsse (400 mA-Buchse) und Einstellungen der beiden Multimeter (vgl. Technische Grundlagen, Seite 11).
- Schalten Sie nun die Spannungsquelle ein, stellen Sie die Strombegrenzung auf 300 mA ein (vgl. Technische Grundlagen) und messen Sie für positive und negative Spannung jeweils sieben Wertepaare von Spannung und Stromstärke, dazu für Spannung 0 V (jeweils ohne Unsicherheit). Wie erhält man negative Spannungen?
- Bestimmen Sie mit dem Multimeter abschließend den genauen Wert R des verwendeten Widerstands mitsamt Unsicherheit.

Folgende Messwerte sollten Sie notiert haben:

- 15 Messwertpaare U_n und I_n im Bereich $-10 \text{ V} \leq U_n \leq 10 \text{ V}$ ohne Unsicherheiten
- R des verwendeten Widerstands mit Unsicherheit

IV.3. Spannungsabhängigkeit von Ionenkanälen

1. Kurzbeschreibung

Sie untersuchen die Spannungsabhängigkeit der Ionenkanäle einer Membran mittels einer Parallelschaltung aus identischen Widerständen und nehmen die U - I -Kennlinie eines solchen Membranabschnitts auf.

2. Messwerte und Durchführung

Anmerkung: Strommessung unbedingt mit der 10 A-Buchse!

- Verbinden Sie alle Kupferplatten der oberen Hälfte der langgezogenen Rastersteckplatte mit den kleinen schwarzen Kurzschlusssteckern.
- Wiederholen Sie dies mit den Kupferplatten der unteren Hälfte (vgl. Abb. 18).
- Ein Stromfluss zwischen Intra- und Extrazellulärraum einer Nervenzelle entspricht im Experiment einem Stromfluss zwischen der oberen und der unteren Hälfte der Rastersteckplatte.
- Jeder *geöffnete* Ionenkanal wird nun durch einen der Widerstände $R_M = 390 \Omega$ simuliert. Ein *geschlossener* Kanal hingegen besitzt einen unendlich hohen Widerstand, daher wird für einen solchen Kanal kein Bauteil verwendet (vgl. Abb. 12). Die Anzahl der geöffneten Kanäle entspricht also der Anzahl n der parallel geschalteten Widerstände.

U_n/V	0,5	1,5	2,0	2,5	2,8	2,9	3,0	3,1	3,2	3,5	4,0	5,0
n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12

Tabelle I: Anzahl n der offenen Ionenkanäle (= Anzahl der parallel geschalteten Widerstände) bei anliegender Spannung U_n .

- Um das spannungsabhängige Verhalten der Kanäle zu simulieren, muss die Anzahl der parallel geschalteten Widerstände gezielt variiert werden. Bauen Sie jeweils eine Parallelschaltung aus $n = 1, 2, 3, \dots, 12$ identischen Widerständen $R_M = 390 \Omega$ auf und legen Sie die zugehörige Spannung U_n an. Verwenden Sie die Vorgaben aus Tabelle I.
- Messen Sie zur Kontrolle U_n mit dem Voltmeter ohne Unsicherheit. Die Spannung kann an einem beliebigen Widerstand abgegriffen werden, da es sich um eine Parallelschaltung handelt.
- Messen Sie auch die jeweilige Stromstärke I_n ohne Unsicherheit. Die Strommessung erfolgt wie im vorherigen Teilversuch, verwenden Sie jedoch **unbedingt die 10 A-Buchse**.
- Für Spannungswerte $U \geq 5 V$ sind bereits alle 12 Kanäle geöffnet. Messen Sie aus dem Bereich $5 V \leq U \leq 10 V$ drei weitere Messwertpaare ohne Unsicherheit.

Folgende Messwerte sollten Sie notiert haben:

- mindestens 15 Wertepaare U_n und I_n jeweils ohne Unsicherheit

IV.4. Elektrotonische Erregungsausbreitung - Dünne, dicke und myelinisierte Nervenzelle

1. Kurzbeschreibung

Sie vermessen ein einfaches Modell für die elektrotonische Erregungsausbreitung entlang einer Membran und bestimmen die Größe λ als Maß für die Ausbreitungsweite für eine dünne, eine dicke und eine myelinisierte Nervenzelle.

2. Messwerte und Durchführung

1. Dünne Nervenzelle

- Bauen Sie auf der langgezogenen Rastersteckplatte eine Schaltung wie in Abb. 14 mit insgesamt $n = 11$ Gliedern auf. Verwenden Sie die Widerstände $R_M = 390 \Omega$ und $R_i = 100 \Omega$.
- Simulieren Sie eine Depolarisation, indem Sie eine beliebige Spannung $5 V \leq U_0 \leq 15 V$ anlegen.
- Messen Sie jeweils die an den einzelnen Membranwiderständen abfallende Spannung U_n ohne Unsicherheit. Verwenden Sie die beiden Messspitzen als Verlängerung für die Messkabel, um leichter messen zu können.

2. Dicke Nervenzelle

- Bauen Sie auf der langgezogenen Rastersteckplatte wieder eine Schaltung wie in Abb. 14 mit insgesamt $n = 11$ Gliedern auf, die die dicke Nervenzelle simuliert. Welche Widerstände sind geeignet?
- Wiederholen Sie die Messungen des letzten Teilversuchs an der aktuellen Schaltung.

3. Myelinisierte Nervenzelle

- Bauen Sie auf der langgezogenen Rastersteckplatte wieder eine Schaltung wie in Abb. 14 mit insgesamt $n = 11$ Gliedern auf, die die myelinisierte Nervenzelle simuliert. Welche Widerstände sind geeignet?
- Wiederholen Sie die Messungen des letzten Teilversuchs an der aktuellen Schaltung.

Folgende Messwerte sollten Sie notiert haben:

- dreimal U_n ($n = 1, \dots, 11$) (je 11 Werte für die dünne, dicke und myelinisierte Nervenzelle) ohne Unsicherheit

V. AUSWERTUNG

V.1. Elektrischer Widerstand von metallischen Leitern

- Schätzen Sie anhand Ihrer Messwerte ab, in welchem Verhältnis die Querschnittsflächen der kurzen und langen Drähte zueinander stehen. Tipp: Es sind keine expliziten Rechnungen nötig, es genügen Proportionalitätsüberlegungen.
- Müssen Sie für diese Überlegungen den Widerstand der verwendeten Messkabel berücksichtigen?
- Vergleichen Sie Ihre gemessenen Körperwiderstände mit dem Literaturwert von ca. 1000Ω für den Widerstand von Hand zu Hand.
- Elektrisches Kinderspielzeug darf höchstens 24 V Gleichspannung aufweisen. Welche Stromstärken würden dabei zwischen Ihren Händen bei trockenen und feuchten Händen auftreten? Beurteilen Sie die im Versuch auftretenden Spannungswerte.

V.2. Ohmscher Widerstand

- Tragen Sie die Werte Ihrer Messung als I - U -Kennlinie auf. Da $R = \frac{U}{I}$ ist, tragen Sie abweichend von der Konvention der unabhängigen und abhängigen Größe besser I nach rechts und U nach oben an.
- Ermitteln Sie graphisch über die Steigung $m = \Delta U / \Delta I$ den Widerstand (ohne Unsicherheit).
- Vergleichen Sie Ihr Ergebnis mit Ihrer Multimetermessung mit Multimeter-Unsicherheit.

V.3. Spannungsabhängigkeit von Ionenkanälen

- Zeichnen Sie die U - I -Kennlinie.
- Wo erwarten Sie, dass sich die Membran wie ein ohmscher Widerstand verhält? Ist dies erfüllt?
- Ermitteln Sie graphisch diesen Widerstand ohne Unsicherheit.

V.4. Elektrotonische Erregungsausbreitung - Dünne, dicke und myelinisierte Nervenzelle

- Tragen Sie für alle drei Zellarten die am n -ten Glied abfallende Spannung U_n gegen die Zahl n in einem gemeinsamen Diagramm auf.
- Jedes Glied der Schaltung entspricht einem Abschnitt einer Nervenzellmembran der Länge $l = 0,5 \text{ mm}$. Bestimmen Sie anhand des Graphen die Größe λ ohne Unsicherheit.

- Am wievielten Glied ist die Depolarisation auf unter 20% abgefallen (sofern ablesbar)?
- Vergleichen Sie die drei Graphen.

VI. ANHANG: ELEKTRIZITÄT UND MENSCH – GEFAHREN

Dieser Anhang ist aus dem Merkblatt „Sicherer Umgang mit elektrischem Strom“ des Bayerisches Landesamtes für Arbeitsschutz, Arbeitsmedizin und Sicherheitstechnik entnommen.

Die Gefährdung des Menschen durch elektrischen Strom hängt nicht - wie oft angenommen - von der Höhe der elektrischen Spannung ab. Die Stromstärke bestimmt die Größe der Gefahr. Schon bei geringer Spannung von einigen Volt kann sich ein Unfall ereignen, wenn große Stromstärken wirksam werden. Beispielsweise verbrannte ein Finger an einer 6-Volt-Autobatterie. Der Ehering hatte die Pole kurzgeschlossen und einen sehr großen Entladestrom ausgelöst. Die Stromeinwirkung ist auch von der Stromart (Gleich- oder Wechselstrom), der Frequenz des Wechselstroms und von dem elektrischen Widerstand des Körpers abhängig. Der Widerstand ist sehr unterschiedlich und wird u. a. bestimmt durch die Berührungsfläche, den Stromweg durch den Körper, den Übergangswiderstand (trockene oder feuchte Haut) und auch durch die Beschaffenheit der Kleidung. Im Mittel kann der Widerstand mit etwa 1000Ω angesetzt werden (z. B. bei einer Durchströmung von Hand zu Hand oder von Hand zu Fuß). Wenn ein Fehlerstrom parallel zum Menschen über einen sehr kleinen Widerstand zur Erde abgeleitet wird, fließt nur ein Teilstrom durch den Menschen. Darauf beruhen eine Reihe von Schutzmaßnahmen. Fließt der Strom nur durch den menschlichen Körper, besteht meist Lebensgefahr.

VI.1. Einwirkungen des elektrischen Stromes auf den Körper

1. Physikalische Einwirkungen

Die Wärmeentwicklung beim Stromdurchgang führt zu inneren und äußeren Verbrennungen aller Schweregrade in Abhängigkeit von der Stromstärke. Große Stromstärken bewirken das Auskochen der Gewebeflüssigkeit und Zerstörung des Eiweißes mit häufig tödlicher Wirkung nach einigen Tagen, da der Körper die giftigen Verbrennungsprodukte nicht abbauen kann. An den Berührungsstellen finden sich oft kleine punktförmige Verbrennungen - Stromdurchschläge durch die Haut - sogenannte Strommarken.

2. Physiologische Einwirkungen

Der elektrische Strom bewirkt ab einer relativ niedrigen Reizschwelle Muskelverkrampfung, oft mit der Folge, dass der berührte Gegenstand vom Verunglückten

nicht mehr losgelassen werden kann. Dies erschwert die Bergung und erhöht die Stromeinwirkungszeit auf Verunglückte. Bei steigender Stromstärke wird das Reizleitungssystem des Herzens beeinflusst. Es entsteht eine unregelmäßige Herzmuskeltätigkeit - Herzmuskelverkrampfung - bis zum Herzstillstand. Bei der Einwirkung von elektrischen Wechselströmen bis 5 mA entstehen nur geringe Einwirkungen; bis 15 mA beginnt das Verkrampfen, Loslassen des Kontaktes ist noch möglich; bei 25-50 mA beginnen Herzunregelmäßigkeiten; über 50 mA tritt Bewusstlosigkeit ein und ab 80 mA setzt Herzkammerflimmern mit tödlicher Wirkung ein.

VI.2. Maßnahmen bei elektrischen Unfällen

Sofortiges Abschalten des elektrischen Stromes im Unfallbereich. Wenn das Abschalten nicht möglich ist, kann der Verunglückte nur unter Verwen-

dung isolierender Hilfsmittel (Kunststoffstangen u. a.) möglichst schnell vom Stromkreis getrennt werden. Ungenügende Isolierung gefährdet den Retter selbst. Bei Annäherung an Hochspannungsanlagen (mehr als 1000 Volt) können auch ohne Berührung Überschläge erfolgen. Lebensgefahr besteht im Spannungstrichter am Erdboden bis mehr als 20 m von der Erdberührungsstelle eines Leiters (Schrittspannung).

Nach der Bergung Verunglückter aus dem Stromkreis ist bei Herzstillstand bzw. Herzkammerflimmern sofort mit der Herz-Lungen-Wiederbelebung zu beginnen. Diese darf bis zum Eintreffen des Rettungsdienstes nicht unterbrochen werden. Durch Strom Verunglückte sind oft nur scheinbar tot - Herzkammerflimmern. Deshalb darf die Wiederbelebung niemals vor dem Eintreffen des Arztes aufgegeben werden. Beengende Kleidungsstücke sind zu lockern. Den Verunglückten nicht entkleiden.