

Schweizerische Armee

---

65.90/I d

**Technische Grundlagen**  
für  
**Übermittlungsgerätemechaniker**

Band I

Gültig ab 1. Oktober 1974

# B. Elektrochemische Stromquellen

## I. Galvanische Elemente

### 1. Einführung

Das galvanische Element, auch Primärelement genannt, kommt meistens in Form von Trockenbatterien in den Handel. Im galvanischen Element werden dank chemischen Vorgängen Elektronen frei, deshalb eignet es sich als Stromquelle. Primärelemente spielen in der Funktechnik eine grosse Rolle, werden doch heute noch die meisten Kleinfunkgeräte mit Trockenbatterien gespeist.

### 2. Was wissen Sie schon über galvanische Elemente?

(Lösung Seite 421)

- Beschreiben Sie den Aufbau eines galvanischen Elementes.
- Welche Betriebsspannung weist eine Zelle einer handelsüblichen Batterie, bestehend aus galvanischen Elementen, auf?
- Was verstehen Sie unter dem Begriff «Elektromotorische Kraft»?
- Was ist ein Ion?
- Zu welcher Elektrode fliesst das Kation, wenn man in eine leitende Flüssigkeit zwei Elektroden taucht und diese mit einer Gleichspannung verbindet?

### 3. Das galvanische Element

#### a. Die chemische Wirkung des elektrischen Stromes

Einige Flüssigkeiten, unter ihnen auch destilliertes Wasser, sind Nichtleiter. Löst man in destilliertem Wasser Kochsalz auf, oder schüttet man etwas Säure dazu, so wird das Wasser leitend. Leitende Flüssigkeiten heissen *Elektrolyte*. Träger des Stromflusses sind die Ionen. Im Elektrolyten werden die Ionen aufgespalten, es bilden sich Anionen und Kationen. Verwendet man beispielsweise als Elektrolyt verdünnte Schwefelsäure, so bilden sich positive Wasserstoffionen, während die aus Schwefel und Sauerstoff bestehenden Moleküle eine negative Ladung aufweisen. Unter dem Einfluss einer an die Elektroden angelegten Gleichspannung wandern die positiven Kationen zur *Katode*, während die negativen Anionen von der *Anode* angezogen werden. Bild 15 zeigt diesen Vorgang. Diejenige Elektrode, welche mit dem negativen Pol der Spannungsquelle verbunden wird, nennt man *Katode*, während die positive Elektrode *Anode* genannt wird.

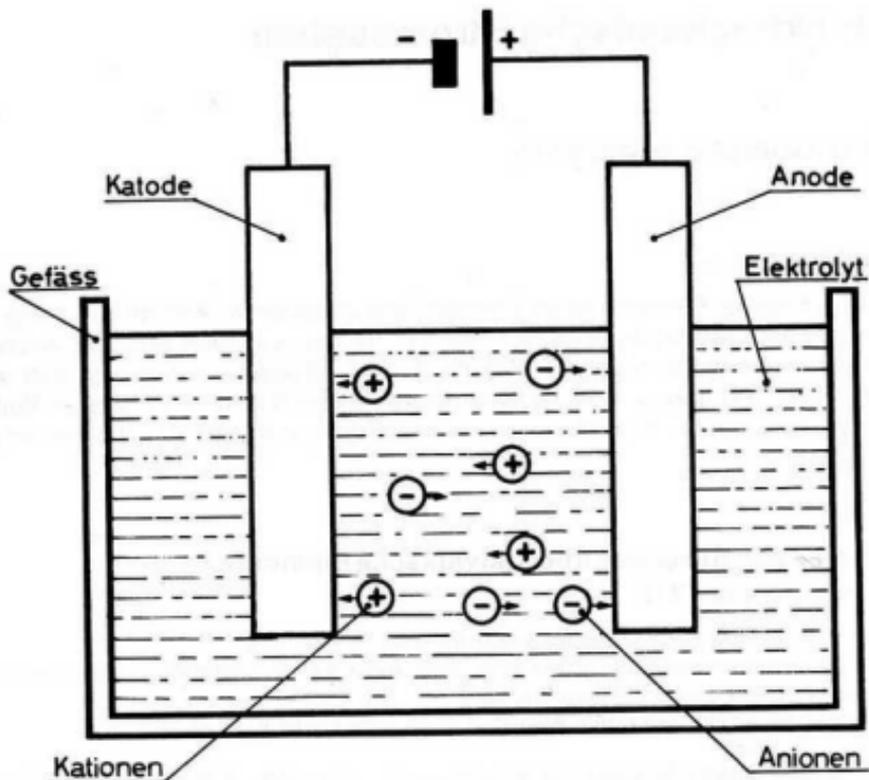


Bild 15

Sobald das Ion die Elektrode, von welcher es angezogen wurde, erreicht, findet ein Ladungsausgleich statt, ein Anion gibt seine überzähligen Elektronen an die Anode ab, während das Kation seine fehlenden Elektronen von der Katode bezieht. Die an die Anode abgegebenen Elektronen wandern durch die Spannungsquelle zur Katode, um dort die ankommenden Kationen zu neutralisieren. Sobald das Ion an der Elektrode neutralisiert ist, wird es nicht mehr von der Kraftwirkung der elektrischen Spannung beeinflusst, da es sich jetzt nach aussen neutral verhält. Handelt es sich beim Ion um ein Gasatom oder um ein Gasmolekül, so wird es ausgeschieden, Metallmoleküle setzen sich auf der Elektrode ab und bilden so einen Metallüberzug. Während jedes elektrolytischen Vorgangs werden Materieteilchen transportiert und oft wird an den Elektroden Materie ausgeschieden.

Der beschriebene Vorgang wird in der Galvanotechnik zur Herstellung von Metallüberzügen praktisch angewendet. Die grundsätzlichen Vorgänge in Elektrolyten helfen uns, die Funktionsweise des Primärelementes und der Akkumulatoren zu verstehen.

## b. Das Primärelement

In den galvanischen Elementen wird mit Hilfe der chemischen Vorgänge in Elektrolyten elektrische Energie erzeugt. Bild 16 zeigt den prinzipiellen Aufbau eines Primärelementes.

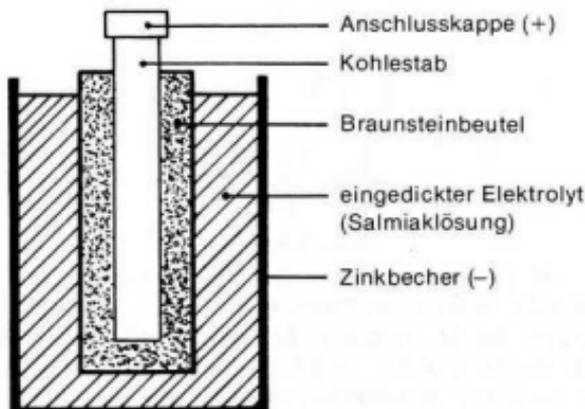


Bild 16

Die Elektroden bestehen aus einem Kohlestab und einem Zinkbecher. Als Elektrolyt dient eine Salmiaklösung, diese wird mit Hilfe eines Pulvers eingedickt. Um den Kohlestab herum wird ein Braunsteinbeutel als Depolarisator angebracht.

Beim chemischen Vorgang, der sich im Primärelement abspielt, werden Elektronen frei. In der Salmiaklösung zerfällt das Salz in Anionen und Kationen. Die Kationen verbinden sich mit der Zinkelektrode und «fressen» diese an. Es werden Elektronen frei, die Zinkelektrode wird zum negativen Pol des Elementes. Die Anionen wandern zum Kohlestab, neutralisieren und scheiden sich als Wasserstoff aus. Durch diese Wasserstoffausscheidungen würde der Kohlestab isoliert und damit würde die Leistungsfähigkeit der Batterie absinken. Der Braunsteinbeutel bindet den Wasserstoff (durch Reduktion des Braunsteins zu Kaliumpermanganat) und verhindert somit diese unerwünschte Gasentwicklung. Der chemische Vorgang setzt ein, sobald die beiden Elektroden über einen Verbraucher miteinander verbunden werden.

## c. Das Betriebsverhalten von galvanischen Elementen

Wir unterscheiden beim galvanischen Element zwischen der *Leerlaufspannung* und der Spannung unter Belastung. Unter der Leerlaufspannung versteht man die Spannung, die an den Klemmen des Elementes auftritt, wenn dieses nicht belastet ist. Diese Leerlaufspannung wird auch «*Elektromotorische Kraft*» (E.M.K.) genannt. Wird das Element mit einem Lastwiderstand belastet, so sinkt die *Klemmenspannung* ab. Diese Erscheinung hat ihre Ursache im

**Innenwiderstand** des Elementes. Man kann für jede Spannungsquelle ein Ersatzschaltbild zeichnen. In diesem Ersatzschaltbild besteht die Spannungsquelle aus einem idealen Element mit einem in Serie geschalteten Innenwiderstand.

Bild 17 zeigt diese Ersatzschaltung.

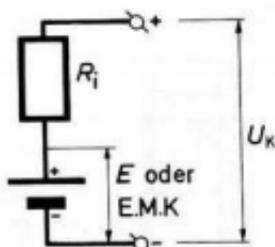


Bild 17: Ersatzschaltbild für eine Spannungsquelle

Im Ersatzschaltbild erzeugt das Element die E.M.K.; wird die Spannungsquelle belastet, so fließt der Strom auch über den Innenwiderstand. Die Spannung, die am Innenwiderstand abfällt, geht für den Verbraucher verloren. Die Klemmenspannung wird um den Betrag des Spannungsabfalles am Innenwiderstand kleiner als die E.M.K. Diese Zusammenhänge können in einer algebraischen Gleichung ausgedrückt werden:

$$U_k = E - I \cdot R_i$$

$U_k$  = Klemmenspannung  
 $I$  = Belastungsstrom  
 $R_i$  = Innenwiderstand

Die E.M.K. des Zink-Kohle-Salmiak-Elementes beträgt 1,6 V, die mittlere Klemmenspannung im Betrieb liegt bei 1,5 V. Je nach Grösse der Elemente beträgt der Innenwiderstand Bruchteile eines Ohms bis zu einigen Ohm.

## 4. Beispiele

### a. Berechnung der Klemmenspannung

In Bild 18 ist die Klemmenspannung zu bestimmen.

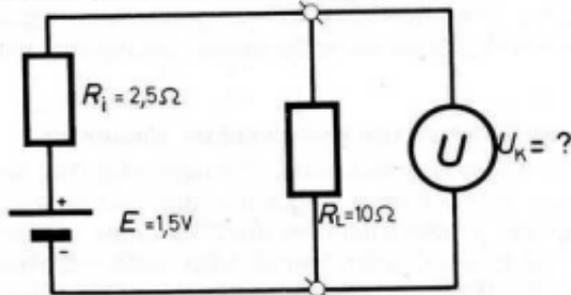


Bild 18

**Vorgehen:**

- Grundformel anschreiben
- Bestimmungsgleichung für  $I$  aufstellen
- Bestimmungsgleichung für  $I$  in Grundformel einsetzen und vereinfachen
- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$U_K = E - I \cdot R_i$$

$$I = \frac{E}{R_i + R_L}$$

$$U_K = E \left(1 - \frac{R_i}{R_i + R_L}\right)$$

$$U_K = 1,5 \left(1 - \frac{2,5}{2,5 + 10}\right)$$

$$U_K = 1,2V$$

**b. Berechnung der E.M.K.**

In Bild 19 ist die E.M.K. zu berechnen.

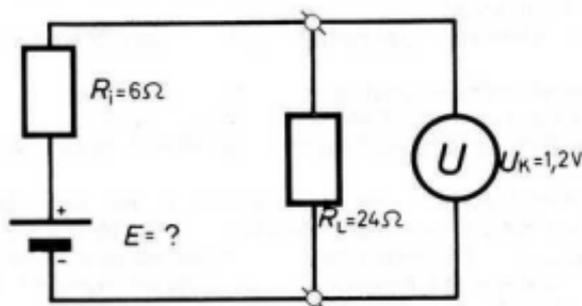


Bild 19

**Vorgehen:**

- Grundformel anschreiben
- Grundformel nach  $E$  umstellen
- Bestimmungsgleichung für  $I$  aufstellen
- Bestimmungsgleichung für  $I$  in Grundformel einsetzen und vereinfachen
- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$U_K = E - I \cdot R_i$$

$$E = U_K + I \cdot R_i$$

$$I = \frac{U_K}{R_L}$$

$$E = U_K \left(1 + \frac{R_i}{R_L}\right)$$

$$E = 1,2 \left(1 + \frac{6}{24}\right)$$

$$E = 1,5V$$

## 5. Das Wesentliche

Im Primärelement wird ein chemischer Vorgang dazu ausgenutzt, um eine elektrische Spannung zu erzeugen. Das gebräuchlichste galvanische Element besteht aus einer Zinkelektrode und einer Kohlenelektrode; als Elektrolyt wird eine eingedickte Salmiaklösung verwendet.

Jede Spannungsquelle kann durch ein Ersatzschaltbild dargestellt werden, dieses enthält die reine Spannungsquelle mit ihrer E.M.K. und den Innenwiderstand. Wird das Element belastet, so entsteht dank dem Belastungsstrom am Innenwiderstand ein Spannungsabfall. Die Klemmenspannung wird um diesen Spannungsabfall kleiner als die E.M.K.

## 6. Repetitionsaufgaben (Lösung Seite 422)

- Was ist ein Elektrolyt?
- Welcher Unterschied besteht zwischen der Stromleitung in einem metallischen Leiter und in einem Elektrolyten?
- Nennen Sie die Materialien der beiden Elektroden des gebräuchlichsten Primärelementes.
- Welche Elektrode stellt den positiven Pol des Elementes dar?
- Definieren Sie den Ausdruck «Elektromotorische Kraft»?
- Warum ist bei Belastung eines Elementes die Klemmenspannung geringer als die E.M.K.?
- Hängt die Klemmenspannung von der Grösse der Belastung des Elementes ab?
- Bestimmen Sie in Bild 20 den Innenwiderstand des Elementes. Sie messen mit einem Voltmeter, das einen sehr hohen Innenwiderstand aufweist, eine Leerlaufspannung von 1,5 V. Sobald Sie das Element mit einem Belastungswiderstand von 10 Ohm belasten, fliesst ein Strom von 0,1 A.

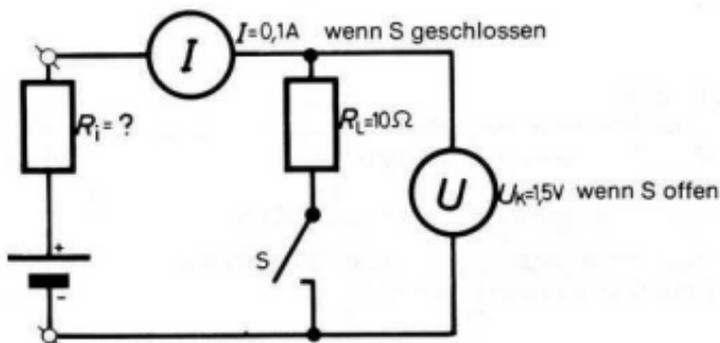


Bild 20

- i) Gemäss Bild 21 belasten Sie ein Element mit zwei verschiedenen Widerständen und messen gleichzeitig die Belastungsströme. Wie gross ist der Innenwiderstand des Elementes?

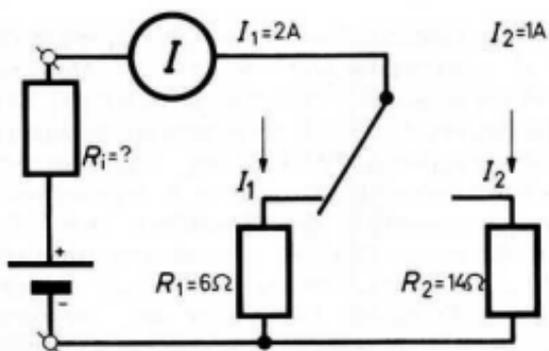


Bild 21

## II. Akkumulatoren

### 1. Einführung

Der Akkumulator, auch Sekundärelement genannt, spielt in der Elektrotechnik und in der Automobiltechnik eine grosse Rolle. In den Motorfahrzeugen finden wir den Bleiakкумуляtor als Bordspannungsquelle des Anlassers, der Beleuchtung und der Stromversorgung. In tragbaren Radioapparaten, in Kleinfunkgeräten, Rasierapparaten und Elektronenblitzgeräten treffen wir meistens den wartungsfreien Stahlakkumulator an. Im Akkumulator sind die chemischen Umsetzungsvorgänge umkehrbar; der Akkumulator kann praktisch beliebig oft geladen und entladen werden. Wir werden uns in diesem Abschnitt nur mit der grundsätzlichen Wirkungsweise der Akkumulatoren befassen. Die Lebensdauer aller Akkumulatoren hängt sehr von ihrer Behandlung ab. Beachten Sie deshalb beim Gebrauch die Wartungs- und Gebrauchsvorschriften, welche je nach Fabrikat und Verwendungszweck wesentlich ändern können. Die Blei- und die Stahl-Akkus haben ganz andere Charakteristiken und verlangen grundsätzlich eine andere Wartung!

### 2. Was wissen Sie schon über Akkumulatoren? (Lösung Seite 424)

- Beschreiben Sie den Aufbau eines Bleiakкумуляtors.
- Ist die Säuredichte im Bleiakкумуляtor ein Mass für den Ladezustand der Zellen?
- Wie gross ist die mittlere E.M.K. einer Zelle des Bleiakкумуляtors?
- Sagt Ihnen der Begriff «Ampère-Stunde» etwas?
- Können einzelne Zellen eines Akkumulators in Serie geschaltet werden?

### 3. Die Akkumulatoren

#### a. Aufbau des Bleiakкумуляtors

Bild 22 zeigt den prinzipiellen Aufbau eines Bleiakкумуляtors. Vor der Ladung bestehen beide Elektroden aus Bleisulfat, als Elektrolyt findet verdünnte Schwefelsäure Verwendung.

In diesem Zustand weist der Akkumulator keine E.M.K. auf. Zur Ladung des Akkumulators wird eine Gleichspannung an die Zelle gelegt. Während des Ladevorganges wandeln sich die beiden Bleisulfatplatten um. An der positiven Platte bildet sich Bleisuperoxyd, während die negative Platte zu reinem Blei wird. Die chemische Reaktion führt zur Bildung von Schwefelsäure, was zur Folge hat, dass die Säurekonzentration ansteigt. Die Säuredichte ist demzufolge ein Mass für den Ladezustand des Akkumulators. Bei der Entladung kehrt sich der chemische Vorgang um, die Elektroden werden wieder zu Bleisulfat, im Elektrolyt wird Wasser gebildet, die Säurekonzentration sinkt.

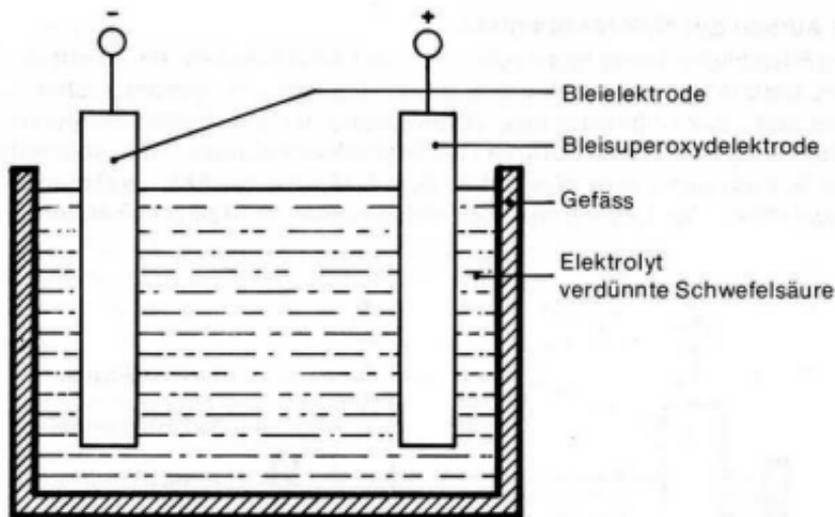


Bild 22: Aufbau eines Bleiakkumulators

## b. Das Betriebsverhalten des Bleiakkumulators

Die E.M.K. der Bleiakkumulatorzelle beträgt im Mittel 2 Volt. Der Innenwiderstand ist je nach der Grösse der Elektroden sehr klein, er liegt in der Grössenordnung von Bruchteilen eines Ohms. Der Bleiakkumulator ist deshalb in der Lage, grosse Ströme abzugeben.

Die *Speicherkapazität* eines Akkumulators wird in *Ampère-Stunden* gemessen. Die Abkürzung für die Ampère-Stunde lautet Ah. Diese Speicherkapazität hängt von der Entladestromstärke ab, je kleiner der Entladestrom, desto grösser die Speicherkapazität. Die Kapazität wird deshalb immer für eine bestimmte Entladezeit angegeben.

Da im Akkumulator mittels chemischer Umwandlungsprozesse elektrische Energie gespeichert werden kann, interessiert natürlich auch der *Wirkungsgrad* des Sammlers. Man unterscheidet zwischen dem *Ampère-Stunden-Wirkungsgrad* und dem *Watt-Stunden-Wirkungsgrad*. Beim Ampère-Stunden-Wirkungsgrad bildet man das Verhältnis zwischen der Ampère-Stunden-Zahl des Entladevorganges und der Ampère-Stunden-Zahl des Ladevorganges. Da jedoch die Ladespannung und die Entladespannung während der Ladung und der Entladung nicht konstant bleiben, zeigt der Ampère-Stunden-Wirkungsgrad nicht die wahre Energiebilanz. Der Watt-Stunden-Wirkungsgrad berücksichtigt die Spannungsänderungen und ist deshalb für einen Wirkungsgradvergleich geeigneter. Der Ampère-Stunden-Wirkungsgrad des Bleisammlers beträgt etwa 90%, während der Watt-Stunden-Wirkungsgrad nur ungefähr 75% erreicht.

### c. Der Aufbau des Stahlakkumulators

Die grundsätzliche Wirkungsweise des Stahlakkumulators entspricht derjenigen des Bleiakkumulators. Während des Ladevorganges findet ein chemischer Prozess statt; dieser bewirkt eine Veränderung des Elektrodenmaterials. Bild 23 zeigt den prinzipiellen Aufbau des Stahlakkumulators. Man unterscheidet bei den Stahlakkumulatoren zwischen dem *Eisen-Nickel-Akku* und dem *Nickel-Kadmium-Akku*. Der Unterschied besteht lediglich im Elektrodenmaterial.

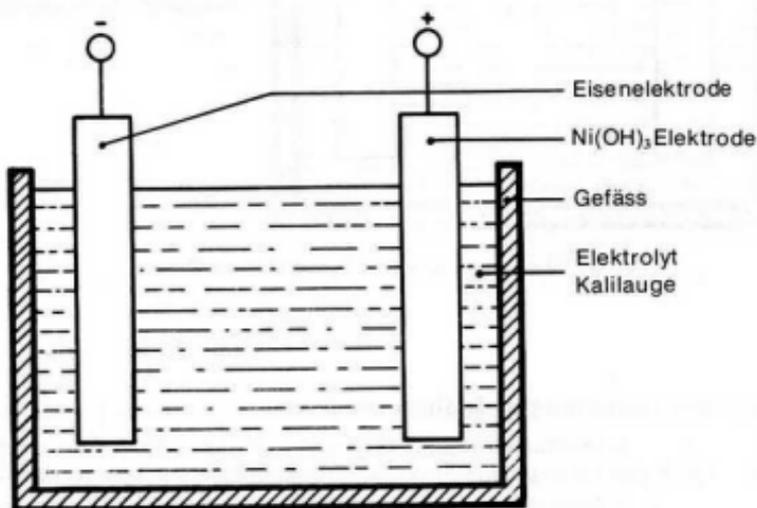


Bild 23: Aufbau eines Eisen-Nickel-Akkumulators

Vor der Ladung besteht die positive Platte aus Nickelhydroxyd und die negative Platte aus Eisenhydroxyd, als Elektrolyt dient verdünnte Kalilauge. Durch den Ladevorgang wird die positive Platte in  $\text{Ni(OH)}_3$  umgewandelt, während die negative Platte zu Eisen wird. Die Kalilauge erfährt dabei keine chemische Umwandlung, die Laugendichte ist demzufolge kein Mass für den Ladungszustand. Während des Entladevorganges kehrt sich der chemische Prozess um, die Elektroden nehmen wieder ihre ursprüngliche Zusammensetzung an.

### d. Das Betriebsverhalten des Stahlakkumulators

Die E.M.K. des Stahlakkumulators beträgt im Mittel 1,2 V pro Zelle. Der Innenwiderstand hängt wie beim Bleiakkumulator von der Grösse der Elektroden ab, er ist jedoch grösser als bei diesem.

Der Wirkungsgrad des Stahlsammlers ist ungünstiger als derjenige des Bleiakkumulators. Der Ampère-Stunden-Wirkungsgrad beträgt zirka 70%, der Watt-Stunden-Wirkungsgrad erreicht im Mittel etwa 60%.

## e. Wartung

Der Bleiakкумуляtor bedarf einer regelmässigen und gründlichen Pflege; er sollte alle 3 bis 5 Wochen entladen und geladen werden. Die Wartung des Bleiakkus ist nicht ungefährlich, in der Nähe von Akkumulatoren, die geladen werden, darf kein Feuer gemacht werden, da Explosionsgefahr besteht. Der Elektrolyt muss kontrolliert werden; durch Nachfüllen von destilliertem Wasser wird verdunsteter Elektrolyt und das gegen Ende der Ladung in Wasserstoff und Sauerstoff (Knallgas, explosiv) zerlegte Wasser ersetzt.

Der Stahlakku erfordert eine bedeutend geringere Wartung, er nimmt keinen Schaden wenn er längere Zeit ungeladen bleibt. Kleinakkus sind oft wartungsfrei gebaut, sie müssen nur von Zeit zu Zeit nachgeladen werden. Die Lebensdauer der Stahlsammler ist denn auch bedeutend höher als diejenige der Bleiakkumulatoren.

## f. Schaltungen von Spannungsquellen

Spannungsquellen lassen sich in verschiedenen Schaltungskombinationen zusammenschalten. Bei der Serieschaltung von Einzelelementen wird immer der Pluspol des vorhergehenden Elementes mit dem Minuspol des folgenden Elementes verbunden. In der Serieschaltung addieren sich die Teilspannungen.

Bei der Parallelschaltung von Spannungsquellen bleibt die Spannung gleich der Spannung eines Einzelelementes. Die zur Verfügung stehende Stromstärke nimmt jedoch mit jedem dazugeschalteten Element zu.

Um eine Zerstörung der Akkus zu vermeiden, dürfen grundsätzlich nur Einzelelemente mit gleicher Spannung und gleichem Innenwiderstand zu Schaltungskombinationen zusammengebaut werden.

## 4. Beispiele

### a. Betriebsverhalten eines Bleiakкумуляtors

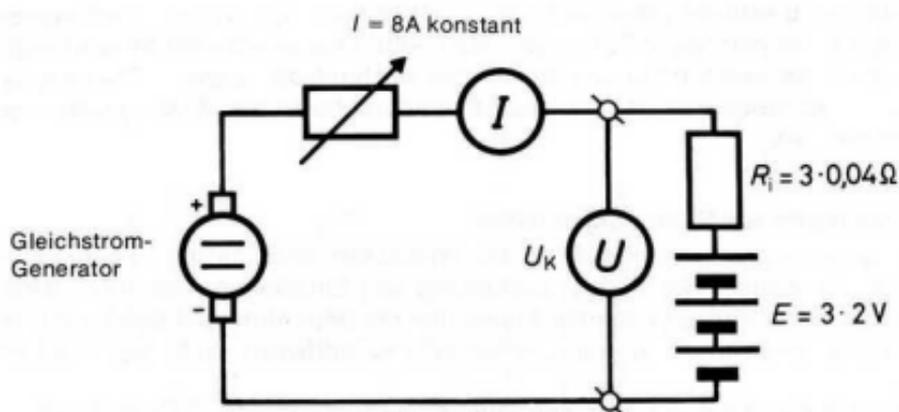
Bild 24 zeigt eine Ladeeinrichtung und die Ladungs- bzw. Entladungscharakteristik eines Bleiakкумуляtors. Dieser besteht aus drei in Serie geschalteten Zellen. Die Ladeeinrichtung ist so gebaut, dass der Ladestrom durch eine Regeleinrichtung während des gesamten Ladevorganges konstant gehalten wird.

Folgende Werte sind bekannt:

- Innenwiderstand pro Zelle: 0,04 Ohm
- Kapazität: 120 Ah bei einer Entladezeit von 15 h
- Wirkungsgrade: Ah-Wirkungsgrad 90%  
Wh-Wirkungsgrad 75%
- Ladestrom: 8 A konstant
- E.M.K. pro Zelle: 2 V
- Aufgenommene Arbeit: 920 Wh

Folgende Werte werden gesucht:

- Erforderliche Ladezeit, wenn der Akku vollständig entladen ist.
- Mittlere Klemmenspannung als Mittelwert für die gesamte Entladedauer von 15 h.
- Kurzschluss-Strom im Falle eines Kurzschlusses bei einer E.M.K. von 2 V pro Zelle.



### Akkuladung

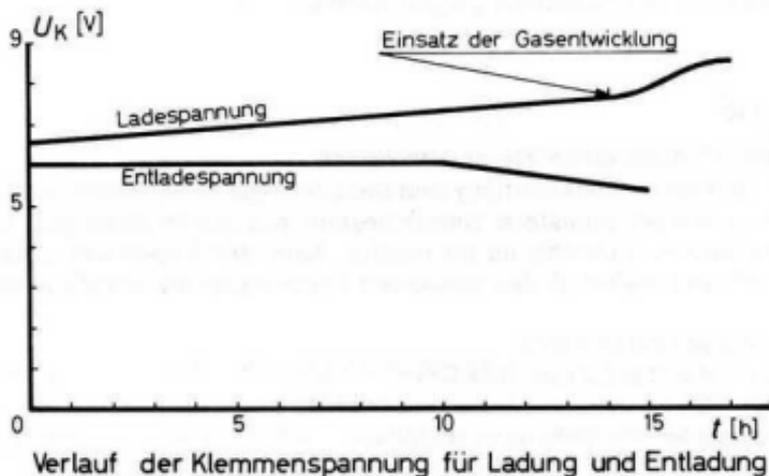


Bild 24

### Vorgehen:

#### 1. Schritt: Berechnung der Ladezeit

- Grundformel für den Ah-Wirkungsgrad anschreiben

$$\eta = \frac{\text{abgegebene Ladung}}{\text{aufgenommene Ladung}}$$

$$\eta = \frac{(I \cdot t)_{\text{abg}}}{(I \cdot t)_{\text{aufg}}} \cdot 100\%$$

- Grundformel nach «aufgenommene Ladung» umstellen

$$(I \cdot t)_{\text{aufg}} = \frac{(I \cdot t)_{\text{abg}} \cdot 100\%}{\eta}$$

- $t_{\text{aufg}}$  isolieren

$$t_{\text{aufg}} = \frac{(I \cdot t)_{\text{abg}} \cdot 100\%}{\eta \cdot I}$$

- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$t_{\text{aufg}} = \frac{120 \cdot 100}{90 \cdot 8} \quad \frac{\text{A} \cdot \text{h} \%}{\text{A} \%}$$

$$t_{\text{aufg}} = 16,7 \text{ h}$$

#### 2. Schritt: Berechnung der mittleren Klemmenspannung

- Grundformel für den Watt-Stunden-Wirkungsgrad anschreiben

$$\eta = \frac{\text{abgegebene Arbeit}}{\text{aufgenommene Arbeit}}$$

$$\eta = \frac{(P \cdot t)_{\text{abg}}}{(P \cdot t)_{\text{aufg}}} \cdot 100\%$$

- Grundformel nach «abgegebene Arbeit» umstellen

$$(P \cdot t)_{\text{abg}} = \frac{\eta \cdot (P \cdot t)_{\text{aufg}}}{100\%}$$

- $P_{\text{abg}}$  isolieren und nach  $U$  umstellen

$$P_{\text{abg}} = \frac{\eta \cdot (P \cdot t)_{\text{aufg}}}{t \cdot 100\%}$$

$$U_{\text{abg}} = \frac{\eta \cdot (P \cdot t)_{\text{aufg}}}{t \cdot I \cdot 100\%}$$

- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$U_{\text{abg}} = \frac{75 \cdot 920}{15 \cdot 8 \cdot 100} \quad \frac{\% \cdot \text{A} \cdot \text{V} \cdot \text{h}}{\text{h} \cdot \text{A} \cdot \%}$$

$$U_{\text{abg}} = 5,75 \text{ V}$$

#### 3. Schritt: Berechnung des Kurzschluss-Stromes

- Grundformel anschreiben

$$I_k = \frac{E}{R_i}$$

- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$I_k = \frac{3 \cdot 2}{3 \cdot 0,04}$$

$$I_k = 50 \text{ A}$$

## b. Das Betriebsverhalten eines Stahlakkumulators

Bild 25a zeigt die Parallelschaltung von zwei gleichen Zellen. Jede Zelle weist eine E.M.K. von 1,2 V und einen Innenwiderstand von 1,4 Ohm auf. Es handelt sich dabei um zwei Stahlakkuzellen mit geringer Kapazität und kleiner Stromabgabe. Solche Zellen finden wir in Geräten, die nur einen geringen Stromverbrauch aufweisen. An Hand dieser Schaltung wollen wir das Betriebsverhalten der Spannungsquelle studieren. Als Belastung verwenden wir einen veränderlichen Widerstand. Wir messen Strom und Spannung für verschiedene Werte des Belastungswiderstandes. Die gemessenen Werte fassen wir in Tabelle 5 zusammen; aus Strom und Spannung bestimmen wir die Leistung und tragen diese ebenfalls in Tabelle 5 ein. Die gemessenen Werte überprüfen wir mit Hilfe des ohmschen Gesetzes.

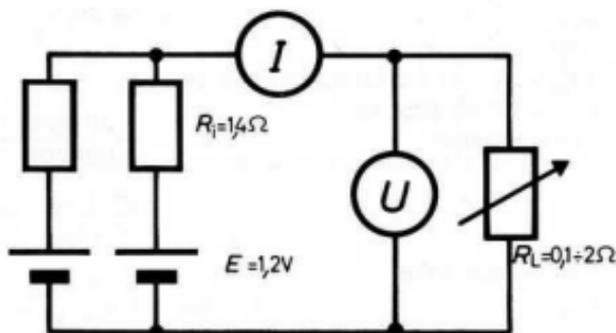


Bild 25a

$R_L$ [ $\Omega$ ]	$I$ [A]	$U$ [V]	$P$ [W]
0,1	1,5	0,15	0,23
0,3	1,2	0,36	0,43
0,5	1,0	0,5	0,5
0,6	0,92	0,55	0,51
0,7	0,86	0,6	0,515
0,8	0,8	0,64	0,51
0,9	0,75	0,67	0,505
1	0,71	0,71	0,50
1,5	0,55	0,83	0,45
2,0	0,44	0,89	0,40

Tabelle 5

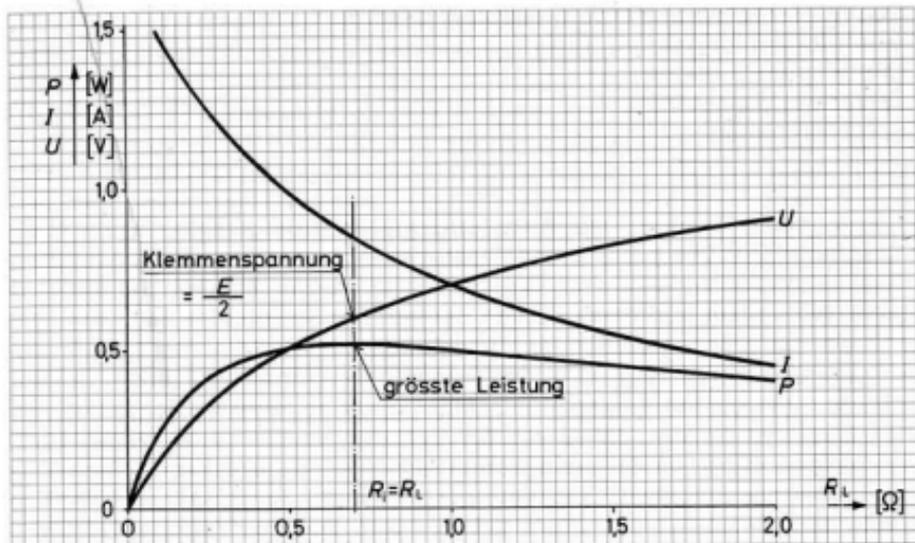


Bild 25b

Für die Berechnungen gehen wir wie folgt vor:

**Vorgehen:**

1. Schritt: Berechnung des Stromes

- Grundformel für die Stromberechnung anschreiben  
Der Innenwiderstand wirkt nur mit dem halben Wert, da beide Innenwiderstände parallel geschaltet sind, und somit jede Zelle die Hälfte des Belastungsstromes aufbringt.

$$I = \frac{E}{\frac{R_i}{2} + R_L}$$

- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen (Im Beispiel führen wir die Rechnung nur für einen Wert des Belastungswiderstandes durch)

$$I = \frac{1,2}{\frac{1,4}{2} + 1,5}$$

$$I = 0,55 \text{ A}$$

2. Schritt: Berechnung der Klemmenspannung

- Grundformel für die Spannung anschreiben
- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$U_K = I \cdot R_L$$

$$U_K = 0,55 \cdot 1,5$$

$$U_K = 0,83 \text{ V}$$

### 3. Schritt: Berechnung der verbrauchten Leistung

- Grundformel für die Leistung anschreiben
- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$P = U \cdot I$$

$$P = 0,83 \cdot 0,55 \text{ V} \cdot \text{A}$$

$$P = 0,46 \text{ W}$$

Die errechneten Werte für alle Belastungswiderstände gemäss Tabelle 5 sind im Diagramm Bild 25b zusammengefasst. Werte, die in einem Diagramm zu Kurven zusammengefasst sind, lassen sich so besser überblicken als in der Tabelle. Wir wollen nun diese Kurven deuten. Die Stromkurve zeigt uns, dass der Strom mit grösser werdendem Belastungswiderstand immer kleiner wird. Die Spannungskurve zeigt eine der Stromkurve entgegengesetzte Tendenz. Der Verlauf der beiden Kurvenzüge scheint uns eine logische Folge des ohmschen Gesetzes zu sein. Je kleiner der Belastungswiderstand gemacht wird, desto grösser muss der Belastungsstrom ausfallen, da Strom und Widerstand sich zueinander umgekehrt proportional verhalten. Je grösser der Wert des Belastungsstromes ausfällt, desto grösser wird der Spannungsabfall am Innenwiderstand der Spannungsquelle. Dieser Spannungsabfall wird nun, wie wir wissen, von der E.M.K. subtrahiert, um die Grösse der Klemmenspannung zu ermitteln; diese Tatsache erklärt den Verlauf der Spannungskurve. Der wichtigste Kurvenzug ist derjenige für die Leistung. Für kleine Werte des Belastungswiderstandes steigt die Kurve steil an, sie erreicht ihr Maximum bei einem Belastungswiderstand von 0,7 Ohm, das heisst: *Der Batterie wird die grösste Leistung entnommen, wenn der Belastungswiderstand gleich gross gemacht wird wie der Innenwiderstand der Batterie.*

Dieser Satz gilt für alle Spannungsquellen. Wir werden in einem späteren Zeitpunkt sehen, dass er auch auf Röhrenschaltungen und Transistorstufen angewendet werden kann. Der Beweis für die Richtigkeit dieser Aussage ist nicht einfach, man muss unter Zuhilfenahme der höheren Mathematik beweisen, dass die Kurve ihr Maximum immer dann erreicht, wenn Innenwiderstand und Belastungswiderstand gleich gross sind.

## 5. Das Wesentliche

Im Sekundärelement sind die chemischen Vorgänge umkehrbar. Der Akkumulator kann nach erfolgter Entladung wieder geladen werden.

Die Kapazität eines Sammlers wird in Ampère-Stunden gemessen.

Für die Bestimmung des Wirkungsgrades eines Akkumulators verwenden wir den Ampère-Stunden-Wirkungsgrad oder den Watt-Stunden-Wirkungsgrad.

Der Watt-Stunden-Wirkungsgrad zeigt die wahre Energiebilanz des Sammlers.

Der Bleiakкумулятор hat einen kleineren Innenwiderstand als ein entsprechender Stahllakкумулятор, dafür ist der Bleiakкумулятор in bezug auf die Wartung anspruchsvoller.

Gleiche Spannungsquellen können in Serie- oder Parallelschaltung zu Batterien zusammengebaut werden. Mit der Serieschaltung erhöhen wir die E.M.K. und den Innenwiderstand. Bei der Parallelschaltung bleibt die E.M.K. konstant und der Innenwiderstand sinkt.

Einer Spannungsquelle wird immer dann die grösste Leistung entnommen, wenn der Belastungswiderstand gleich gross ist wie der Innenwiderstand.

## 6. Repetitionsaufgaben (Lösung Seite 424)

- a) Aus was besteht der Elektrolyt beim Bleiakкумулятор?
- b) In welcher Form wird beim Bleiakкумулятор verdunsteter Elektrolyt ersetzt?
- c) Welche Vorsichtsmassnahme muss man bei der Ladung eines Bleiakкумуляtors beachten?
- d) Welches ist die Masseinheit für die Speicherkapazität von Akкумуляtoren?
- e) Erklären Sie die beiden Masseinheiten für den Wirkungsgrad eines Sammlers.
- f) Welche der beiden Masseinheiten ergibt ein realistischeres Bild vom Wirkungsgrad?
- g) Welches ist der Hauptvorteil des Stahllakкумуляtors gegenüber dem Bleiakкумуляtor?
- h) Welcher Akкумуляtor weist den besseren Wirkungsgrad auf, der Bleisammler oder der Stahllakku?
- i) Bei welcher Akkusorte erreicht man kleinere Innenwiderstände, beim Bleiakku oder beim Stahllakku?
- k) Ist die Säuredichte ein Mass für den Ladungszustand der Zelle?
- l) Ist die Dichte der Lauge ein Mass für den Ladungszustand der Zelle?
- m) 6 Zellen eines Bleiakkus mit einer E.M.K. von 2 V und einem Innenwiderstand von 0,01 Ohm werden in Serie geschaltet. Bei welchem Belastungswiderstand kann diese Batterie die grösste Leistung abgeben? Wie gross ist die Klemmenspannung für diesen Betriebsfall?
- n) 4 Zellen eines kleinen Stahllakкумуляtors mit einer E.M.K. von 1,2 V und einem Innenwiderstand von 0,8 Ohm werden parallel geschaltet. Wie gross wird der Strom im Falle eines Kurzschlusses?