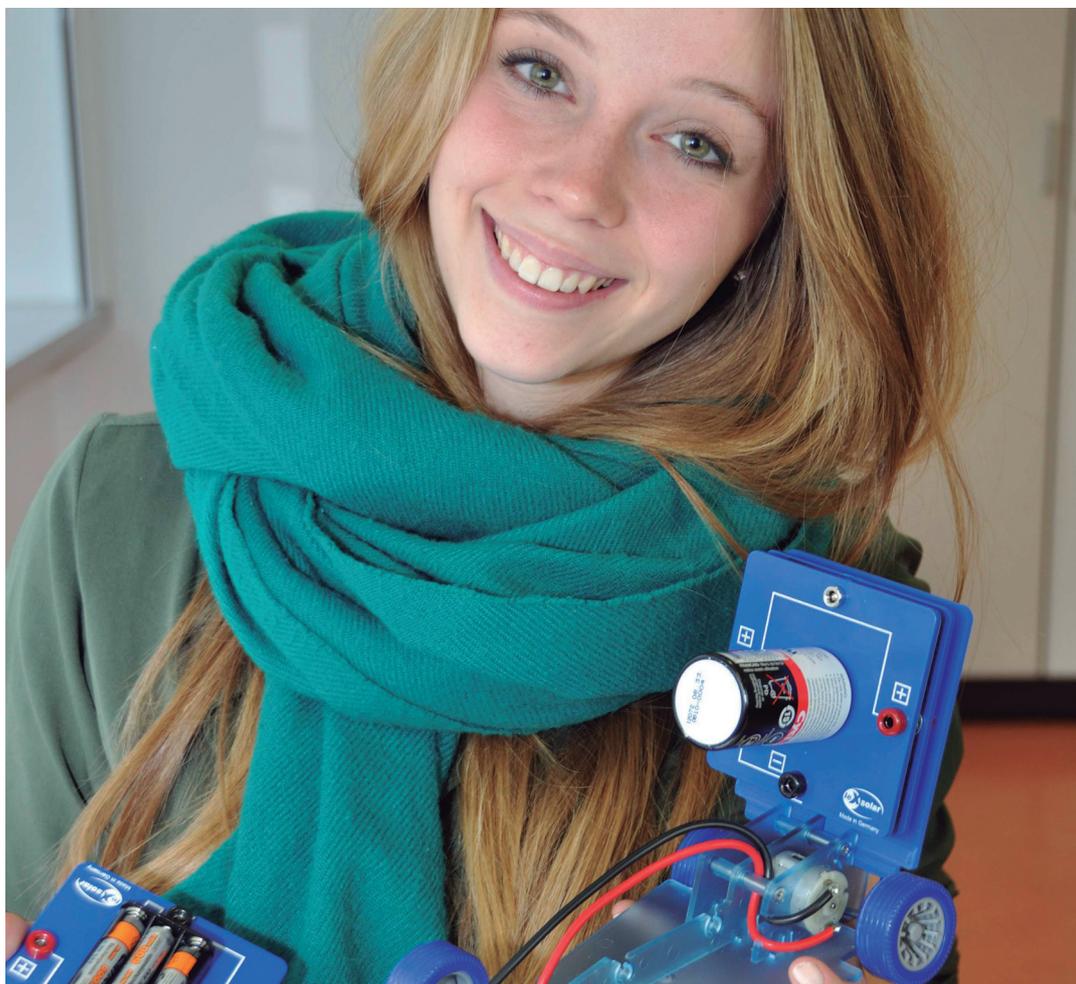
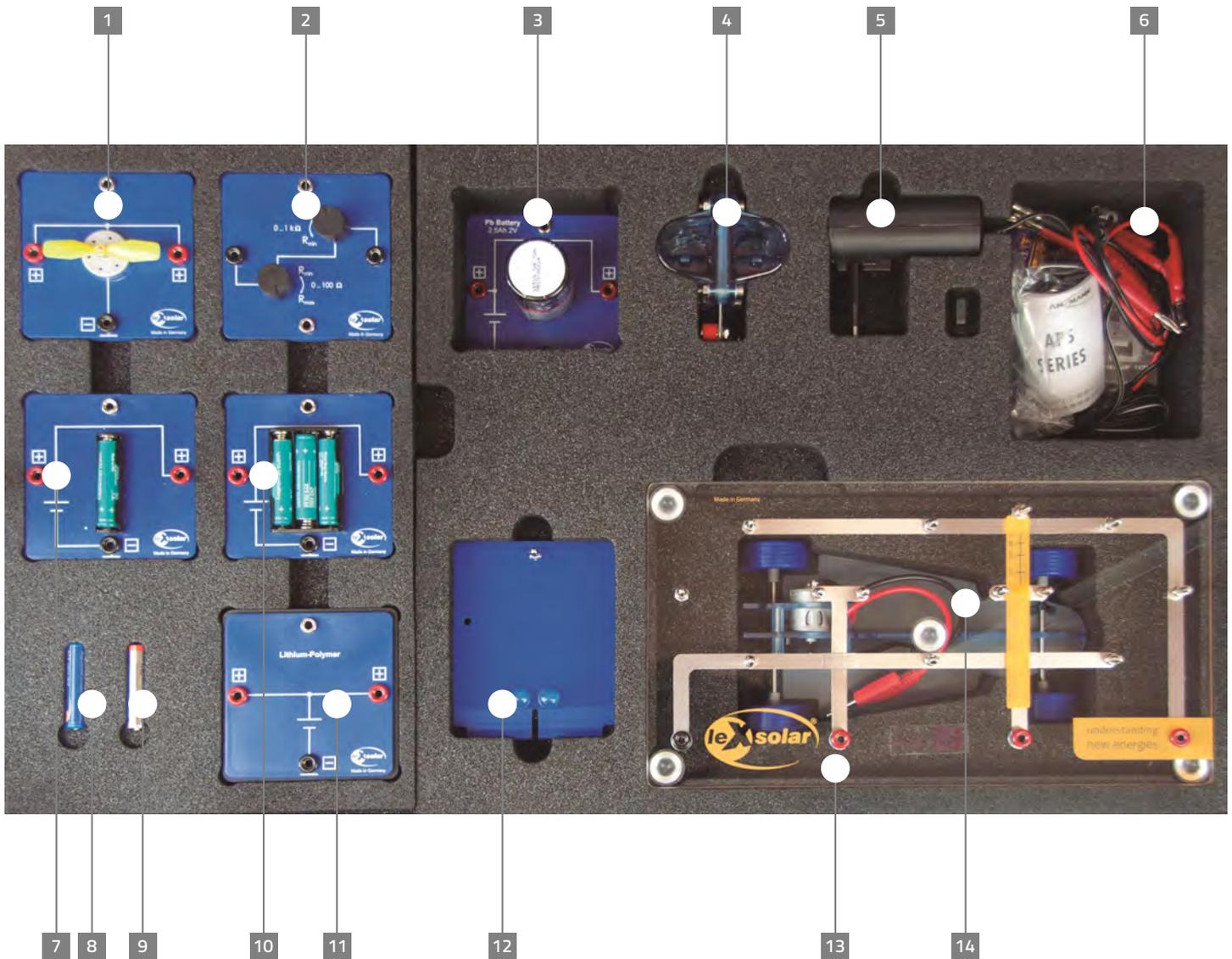


# leXsolar-Estore Ready-to-go



Lehrerheft

Layout diagram leXsolar-EStore Ready-to-go  
 Item-No.1803  
 Bestückungsplan leXsolar-EStore Ready-to-go  
 Art.-Nr.1803

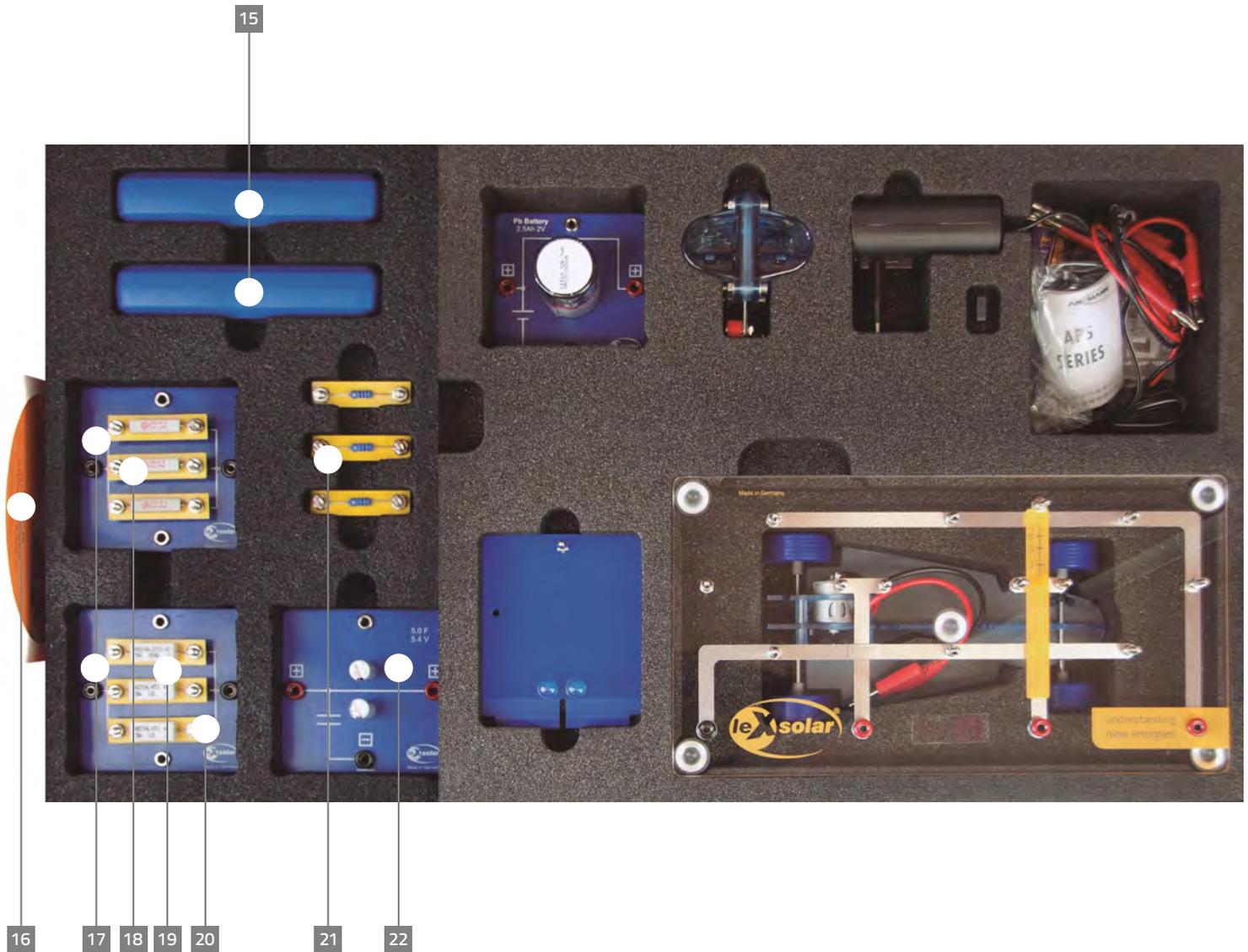


- |  |  |
|--|--|
| <p><b>1</b> 1118-02 Motor module Pro<br/>         1118-02 Motormodul Pro<br/>         L2-02-017 Yellow propeller<br/>         L2-02-017 Luftschraube (Propeller) gelb</p> <p><b>2</b> 1118-04 Potentiometer module<br/>         1118-04 Potentiometermodul</p> <p><b>3</b> 1800-13 Lead (Pb)-battery module Pro<br/>         1800-13 Blei-Akkumodul Pro</p> <p><b>4</b> L2-06-067 Reversible Fuel cell Pro<br/>         L2-06-067 Reversible Brennstoffzelle Pro</p> <p><b>5</b> 2105-00 Universal-power supply<br/>         2105-00 Stromversorgungsgerät</p> <p><b>6</b> 2xL2-06-012/013 Test leads black/red<br/>         2xL2-06-012/013 Messleitung schw./rot</p> <p><b>7</b> 1800-08 NiMH Battery module 1xAAA Pro<br/>         1800-08 NiMH-Akkumodul 1xAAA Pro</p> | <p><b>8</b> 1801-06 LiFePo-battery AAA<br/>         1801-06 LiFePo-Akku AAA</p> <p><b>9</b> L2-04-102 NiZn-battery AAA<br/>         L2-04-102 NiZn-Akku AAA</p> <p><b>10</b> 1118-09 NiMH Battery module 3xAAA Pro<br/>         1118-09 Akkumodul NiMH 3xAAA Pro</p> <p><b>11</b> 1800-07 Lithium-polymer-battery module<br/>         1800-07 Lithium-Polymer-Akkumodul Pro</p> <p><b>12</b> Battery adapter for <b>14</b><br/>         Akku-Adapter für <b>14</b></p> <p><b>13</b> 1801-07 leXsolar Base unit EStore<br/>         1801-07 leXsolar Grundeinheit EStore</p> <p><b>14</b> 1801-02 Electric model car with <b>12</b><br/>         1801-02 Elektro-Modellfahrzeug mit <b>12</b></p> |
|--|--|

Version number  
 Versionsnummer

L3-03-167\_24.09.2014

Layout diagram leXsolar-EStore Ready-to-go  
 Item-No.1803  
 Bestückungsplan leXsolar-EStore Ready-to-go  
 Art.-Nr.1803



- 15 2xL2-06-011 Digital multimeter  
2xL2-06-011 Digitalmultimeter
- 16 L3-03-016 leXsolar-CD  
L3-03-016 leXsolar-CD
- 17 2x1800-01 Resistor module (triple) Pro  
2x1800-01 Widerstandsmodul 3-fach Pro
- 18 3x1800-05 Resistor plug element 10 Ohm  
3x1800-05 Widerstands-Steckelement 10 Ohm
- 19 2x1800-03 Resistor plug element 1 Ohm  
2x1800-03 Widerstands-Steckelement 1 Ohm
- 20 1800-06 Resistor plug element 33 Ohm  
1800-06 Widerstands-Steckelement 33 Ohm
- 21 3x1800-04 Resistor plug element 100 Ohm  
3x1800-04 Widerstands-Steckelement 100 Ohm
- 22 1118-11 Capacitor modul Pro  
1118-11 Kondensatormodul Pro

# leXsolar-EStore Ready-to-go

## Lehrerheft

### Inhaltsverzeichnis

#### **I Allgemeine Informationen**

1.	Bestandteile .....	5
2.	Allgemeine Hinweise zum sicheren Umgang mit Akkus und Ladegeräten .....	9
1.	Historie .....	10
2.	Direkte und indirekte Speicher.....	11
2.1.	Kondensatoren .....	11
2.2.	Schwungradspeicher .....	12
2.3.	Pumpspeicherkraftwerke .....	12
3.	Allgemeiner Überblick, Grundlagen und Einführung Batterien .....	13
3.1.	Primärbatterien .....	13
3.2.	Sekundärbatterien .....	13
3.3.	Blei-Akkumulator .....	14
3.4.	Nickel-Metallhydrid-Akkumulator (NiMH) .....	15
3.5.	Lithium-Ionentechnologie.....	17
3.6.	PEM-Brennstoffzelle .....	19
4.	Grundlagen .....	20
4.1.	Die Nennspannung von Spannungsquellen .....	20
4.2.	Innenwiderstandsbestimmung .....	21
4.3.	UI-Kennlinien.....	22
4.4.	Ladeverfahren .....	23
4.5.	Entladeverhalten von Batterien.....	26
4.6.	Wirkungsgrad von Batterien und Brennstoffzellen .....	27
4.7.	Temperaturverhalten eines Akkumulators.....	29
5.	Anwendungsbeispiele .....	30
5.1.	Packaging.....	30

5.2. Anwendung PKW .....	31
5.3. Energiekostenvergleich von Netzstrom und Batterien.....	32
5.4. Speicherkapazität von Energieversorgungsnetzen .....	34

## **II Versuchsanleitungen mit Musterlösungen**

1 Zusammenhang zwischen Strom, Widerstand und Spannung .....	35
2.1 Die Nennspannung von Spannungsquellen.....	36
2.2 Der Innenwiderstand von Spannungsquellen.....	39
2.3 Reihenschaltung von Spannungsquellen.....	41
3.1 Das Ladeverfahren eines Akkumoduls mit Widerständen .....	43
3.2 Das Entladeverfahren eines Akkumoduls .....	46
4.1 Das Ladeverhalten des Kondensators .....	49
4.2 Das Entladeverhalten des Kondensators.....	52
5.1 Die Wasserstoffproduktion der reversiblen Brennstoffzelle .....	55
5.2 Der Wasserstoffverbrauch einer Brennstoffzelle .....	57
5.3 Der Wirkungsgrad der Brennstoffzelle .....	59
5.4 Betrieb des Elektroautos mit verschiedenen Akkumodulen.....	61
5.5 Betrieb des Elektroautos mit einer Brennstoffzelle.....	64

## II Theoretische Vorbetrachtungen

### 1. Historie

Die moderne Elektrizitätslehre, wie wir sie heute kennen ist ursprünglich zwei italienischen Gelehrten zu verdanken: Anatomieprofessor Luigi Galvani (1737-1798) und Physikprofessor Alessandro Volta (1745-1827). Den Grundstein legte Galvani unbewusst durch Experimente an frisch getöteten und zum Sezieren vorbereiteten Fröschen. Er untersuchte die Wirkungsweise seiner „Elektrisiermaschine“ auf die Muskeln der Frösche und bemerkte dabei, dass der Froschschenkel krampfartig ausschlug, sobald er mit dem Skalpell den dazugehörigen Nerv berührte. Dabei entstand ein Funke an der Elektrode, welche sich neben Galvanis „Elektrisiermaschine“ befand.

Heutzutage ist das Phänomen bekannt als Induktionsstrom durch den Muskel, welcher durch die Nervenreizung mithilfe des Skalpells ausgelöst wird.

Dieser elementare elektrophysiologische Effekt war damals völlig neu und blieb lange Zeit unverstanden. Galvani untersuchte ihn durch systematische Variation der experimentellen Bedingungen und fand später heraus, dass der Froschschenkelnerv auch ohne Hilfe seiner Elektrisiermaschine ausschlug, sobald er ihn gleichzeitig mit zwei verschiedenen, miteinander verbundenen Metallnadeln berührte.

Mit Hilfe dieses Experiments entdeckte er die „galvanische Elektrizität“, bei der durch die Verbindung zweier unterschiedlicher Metalle ein kleiner Strom durch den im Gewebe befindlichen Elektrolyten fließt.

Galvani interpretierte seine Entdeckung zunächst falsch, indem er annahm, dass die Muskelkontraktionen durch positive und negative gespeicherte Elektrizität hervorgerufen werden, woraufhin eine jahrelange Auseinandersetzung zwischen Galvani und Volta entbrannte, die zu keinem Ergebnis führte. Galvani war bis zu seinem Tod fest davon überzeugt, dass seine „animalische“ Elektrizität eine andere als die „physikalische“ Elektrizität war. Volta erkannte hingegen, dass der Froschschenkel keine Quelle oder Speicher von Elektrizität war, sondern lediglich als eine Art Messsensor einer von außen angelegten elektrischen Spannung diente.

Volta führte im Laufe seines Lebens unzählige weitere Experimente auf dem Gebiet der Elektrizitätslehre durch und ein weiterer Meilenstein gelang ihm, als er die oben beschriebenen Metallpaare mit schwachen Effekten übereinanderlegte und damit eine serielle Schaltung baute, in der die geringen Ströme summiert wurden. So entwickelte er um 1800 die nach ihm benannte „Voltaische Säule“. Die erste Batterie, wie wir sie heute verstehen war also eine rein chemische bzw. elektrochemische Stromquelle.

Die Voltaische Säule bestand aus mehreren, abwechselnd übereinandergelegten Plättchen aus Zink, Kupfer und dazwischen liegenden Scheiben aus in Kochsalzlösung oder Lauge getränkter Baumwolle. Volta experimentierte mit verschiedenen Materialien, die ergiebigsten Ergebnisse jedoch erreichte er mit den Paaren Silber-Zink und Kupfer-Zink. Am Ende der Säule konnte eine Spannung entnommen werden, die der Summe der Einzelspannungen der jeweiligen Schicht entsprach (etwa 1,1 V pro Element, bezogen auf Kupfer-Zink). Da Volta mit Hilfe seiner Säule beachtliche Zeiträume mit Strom arbeiten konnte, setzte diese sich schnell für chemische, physische und elektrophysiologische Zwecke durch. Durch die Vielzahl an zusammengeschalteten Elementen identischer Bauart ist der Begriff Batterie entstanden.

Die Batterie bezeichnete dabei ursprünglich die Zusammenschaltung mehrerer galvanischer Zellen. Allerdings hat sich umgangssprachlich die Bezeichnung Batterie für alle Typen durchgesetzt, während die korrekte Bezeichnung „Galvanische Zelle“ lauten müsste. Eine galvanische Zelle bzw. ein galvanisches Element bezeichnet ein Bauteil, in welchem eine chemische Umwandlung in Kombination von zwei verschiedenen Elektroden und einem Elektrolyt, in elektrische Energie stattfindet. Man unterscheidet bei galvanischen Zelle drei verschiedene Typen: Primärzelle, Sekundärzelle und Brennstoffzelle, auf die in den folgenden Kapiteln eingegangen wird.

## 2. Direkte und indirekte Speicher

Kondensatoren und Spulen werden als direkte Speicher bezeichnet und können elektrische Energie direkt ohne Umwandschritte speichern. Der Nachteil besteht in ihrer geringen Kapazitätsmenge, dafür können Sie schnell geladen werden und besitzen dadurch ein dynamisches Lade- und Entladeverhalten. Kondensatoren werden aufgrund ihrer Eigenschaften oft zur Glättung von Spannungsspitzen genutzt. Spulen werden außer in der Grundlagenforschung nicht für die direkte Energiespeicherung genutzt.

Unter der indirekten Speicherung versteht man das Umwandeln der elektrischen Energie (EE) in eine mechanische (ME), thermische (TE), chemische (CE) oder thermo-chemische Energie (TCE). Bei indirekter Speicherung sind höhere Ladekapazitäten möglich, dafür nimmt die Aufladung und die Energiebereitstellung eine weitaus längere Zeit in Anspruch als bei direkten Speichern. Zu den mechanischen Speichern zählen Pumpspeicher, Schwungradspeicher und Druckluftspeicher. Dampfspeicher zählen zu den thermischen Speicherarten. Die bedeutendsten chemischen Speicher sind Batterien und Brennstoffzellen.

### 2.1. Kondensatoren

Zur Energiespeicherung werden heutzutage sogenannte Superkondensatoren (Supercaps) eingesetzt. Diese zeichnen sich durch sehr hohe Kapazitäten, eine hohe Dynamik und eine hohe Gesamt-Zyklenzahl aus. Es sind Kapazitäten bis zu mehreren tausend Farad möglich. Dennoch liegt deren Gesamtkapazität immer noch weit unter der Gesamtkapazität einer Batterie (<10 %). Die max. Spannung dieser Einzelkondensatoren liegt dabei meist unter 2,7 V. Der Wirkungsgrad bei Kondensatoren liegt bei über 90 %.

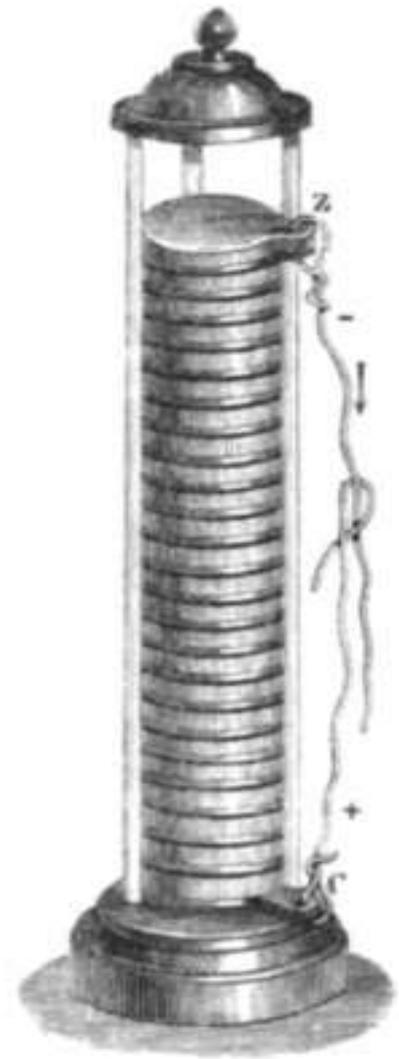
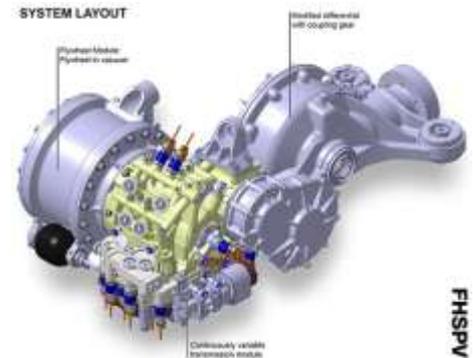


Abb.1.1: Voltaische Säule

## 2.2. Schwungradspeicher

Beim Schwungrad wird die mechanische Energie in Rotationsenergie umgewandelt und gespeichert. Bei der Rückführung wird der Rotor abgebremst und die gespeicherte Energie rückgewonnen. Moderne Schwungradrotoren bestehen aus Kohlefaserwerkstoffen und haben Drehgeschwindigkeiten von bis zu 50.000 U/min. Verschiedene Automobilkonzerne forschen momentan an Einsatzmöglichkeiten speziell im Zusammenhang mit der Rekuperation der Bremsenergie. Moderne Schwungradspeicher besitzen eine hohe Lade- und Entladedynamik und können hohe Leistungen in wenigen Sekunden aufnehmen bzw. abgeben.



Quelle: www.wired.com

Abb.2.1: Schwungradspeicher

## 2.3. Pumpspeicherkraftwerke

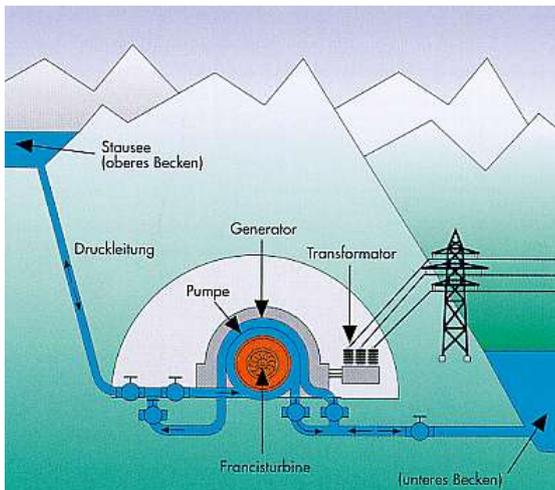


Abb.2.2: Pumpspeicherwerk, schematisch

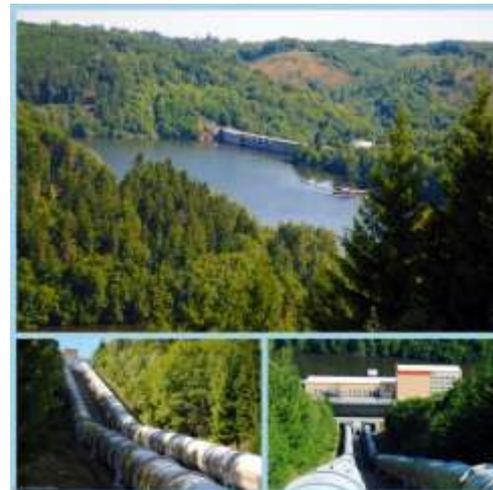


Abb.2.3: Pumpspeicherkraftwerk Geesthacht

Pumpspeicherkraftwerke speichern Strom, indem bei Stromüberschuss Wasser in den höher gelegenen Speichersee gepumpt wird, und später bei Bedarf das Wasser talwärts durch eine Wasserturbine fließt. Die Wasserturbine treibt einen Generator an, der wiederum elektrischen Strom erzeugt. Der Wirkungsgrad liegt bei ca. 80%.

### Übersicht elektrischer Energiespeichertechnologien

Speichertechnologie	typ. Ladezeit	typ. Entladezeit	Energiedichte in Wh/kg	Wirkungs-grad	Lebensdauer
Super-Caps	< 100 s	< 100 s	5	>90 %	500.000**
Sekundärbatterien	1 h – 4 h	4 h - 180 d	25-200	>80 %	500 – 1500 **
Schwungradspeicher	< 10 s	< 10 s	20 – 75	>90 %	k.A.
Pumpspeicherkraftwerk	5 h – 20 d	5 h – 20 d	0,4	80 %	k.A.
Wasserstofftechnologie	< 10 min.	4 h – 7 d	16.500*	50	>5.000 h

\*Bezogen auf den Brennwert H<sub>2</sub> mit 50 % Wirkungsgrad

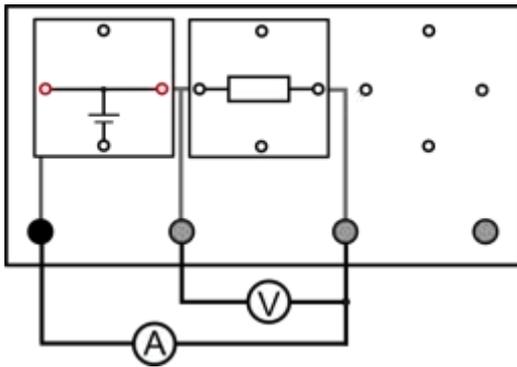
\*\* Ladezyklen

## 1 Zusammenhang zwischen Strom, Widerstand und Spannung

## Aufgabe

Untersuche den Zusammenhang zwischen Spannung, Strom und Widerstand in einem einfachen Stromkreis.

## Aufbau



## Benötigte Geräte

- 1 Grundeinheit
- NiMH-Akkumodul dreifach
- 1 Widerstandsmodul 3-fach
- 3 Widerstandssteckelemente ( $R=100\Omega$ ,  $R=33\Omega$ ,  $R=10\Omega$ )
- 1 Spannungsmessgerät
- 1 Strommessgerät
- Kabel

## Durchführung

1. Baue den Versuch entsprechend dem Schaltplan auf.
2. Miss Strom und Spannung bei verschiedenen Widerständen:
  - $R=100\Omega$
  - $R=33\Omega$
  - $R=10\Omega$
3. Notiere Deine Messwerte (siehe Tabelle).

## Messwerte

angegebener Widerstand in $\Omega$	100	33	10
U in V	3,01	2,65	1,83
I in mA	30	80	187
Quotient $U/I$ in V/A	100,33	33,125	9,79

## Auswertung

1. Berechne jeweils den Quotienten  $U/I$  und trage die Werte in obige Tabelle ein.
2. Welches Gesetz spiegelt Deine gewonnenen Erkenntnisse wieder?

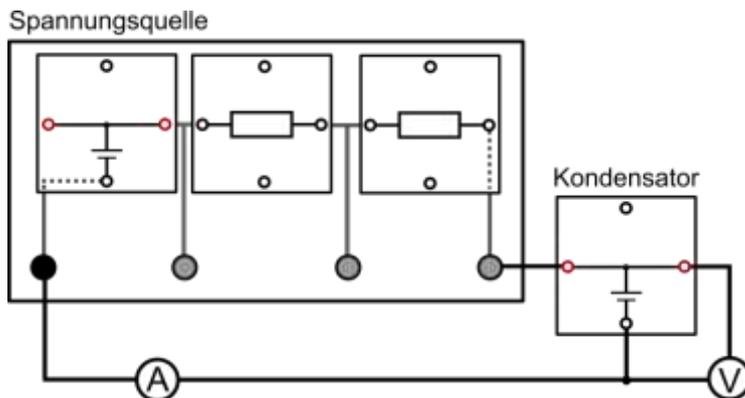
Ohmsches Gesetz:  $R=U/I$

## 4.1 Das Ladeverhalten des Kondensators

### Aufgabe

Nimm die Ladekurve eines Kondensators auf.

### Aufbau



### Benötigte Geräte

- 1 Grundeinheit
- 1 Lithium-Polymer-Akkumodul oder NiMH-Modul, dreifach
- 1 Spannungsmessgerät
- 1 Strommessgerät
- 2 Widerstandsmodule 3-fach
- Widerstands-Steckelemente
- 1 Kondensatormodul
- Kabel

### Durchführung

1. Baue den Versuch entsprechend dem Schaltplan auf.
2. Lade den Kondensator mit Hilfe der Widerstände, die in der Tabelle angegeben sind. Um die gewünschten Widerstandswerte zu erreichen, müssen die mitgelieferten Widerstände parallel oder in Reihe geschaltet werden.
3. Nimm 100, beziehungsweise 200 Sekunden lang in Abständen von 10s die Spannungs- und Stromwerte auf und trage Deine Messwerte in die Tabelle ein.

**Hinweis:** Achte beim Aufbau darauf, dass sich vor Beginn der Messung kein Widerstand im Widerstandsteckmodul befindet, damit der Ladevorgang nicht ohne die Aufnahme der Messwerte beginnt.

### Auswertung

1. Trage Deine Messwerte in die Diagramme ein.
2. Was kann anhand der Diagramme über das Ladeverhalten des Kondensators ausgesagt werden?
3. Nach welcher Zeit ist der Kondensator zu ca. 60% geladen?

### Messwerte

$R_1 = 5\Omega$ : [\(hier mit LiPo-Modul aufgenommen\)](#)

t in s	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
U in V	1,05	1,71	2,31	2,68	2,94	3,12	3,24	3,33	3,40	3,44
I in mA	450	320	220	150	110	80	60	40	30	20



## 4.1 Das Ladeverhalten des Kondensators

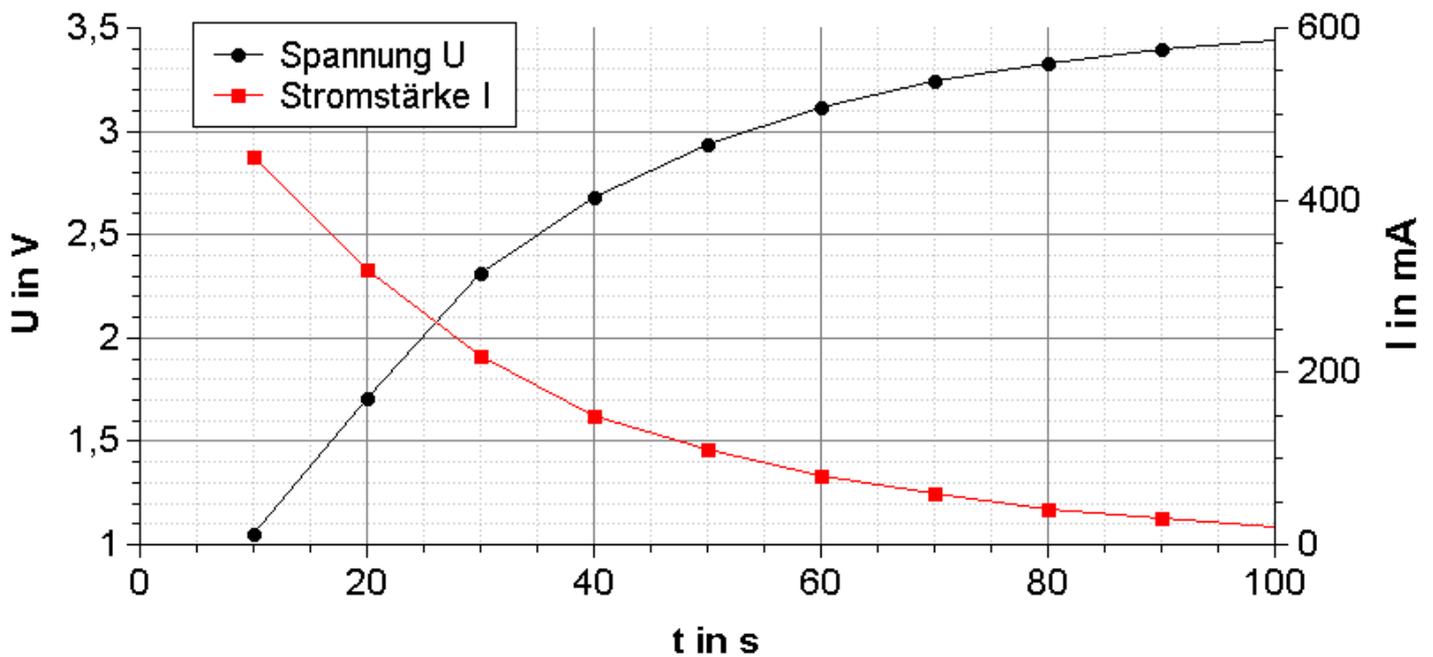
## Messwerte

 $R_2 = 10\Omega$ :

t in s	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
U in V	1,01	1,58	1,97	2,25	2,49	2,66	2,82	2,95	3,05	3,14
I in mA	220	180	140	110	90	80	60	50	40	40

t in s	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200
U in V	3,20	3,26	3,31	3,35	3,39	3,42	3,44	3,46	3,48	3,49
I in mA	30	30	20	20	10	10	5	5	5	0

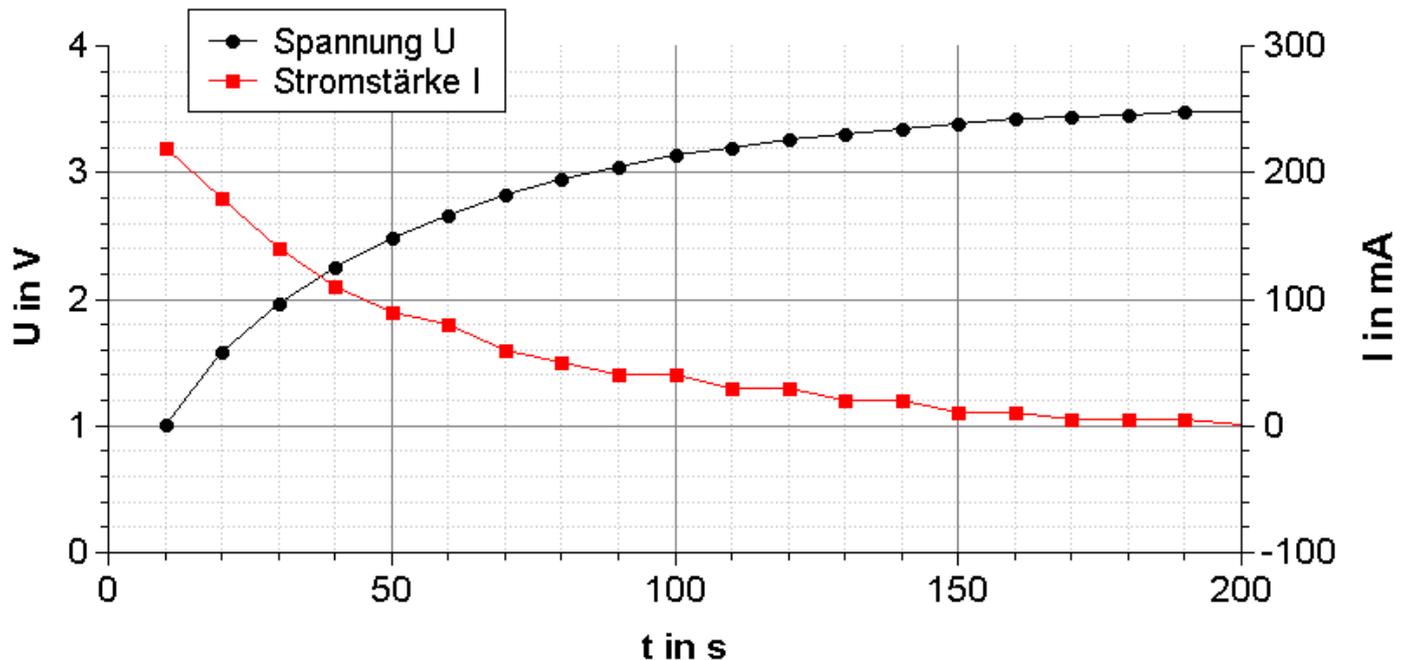
## Diagramme

 $R_1 = 5\Omega$ :



## 4.1 Das Ladeverhalten des Kondensators

## Diagramme

 $R_2 = 10\Omega$ :

## Auswertung

2.

Anstieg der Spannung mit der Zeit, Stromstärke nimmt ab. Je kleiner der Lastwiderstand, desto größer die Stromstärke und desto schneller wird die maximale Ladespannung erreicht. Der Ladeprozess läuft dementsprechend schneller ab bei höheren Stromstärken (also bei kleinerem Lastwiderstand)

3.

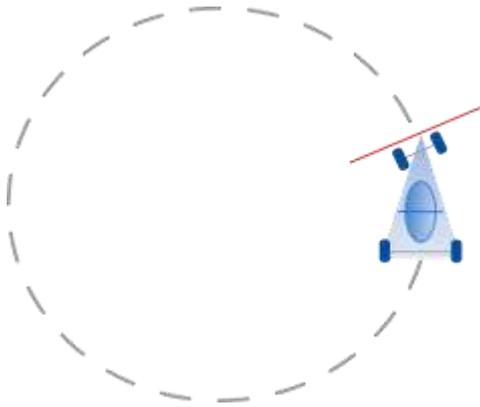
Nach etwa 35 Sekunden ( $R=5\Omega$ ), beziehungsweise 40 Sekunden ( $R=10\Omega$ )

## 5.5 Betrieb des Elektroautos mit einer Brennstoffzelle

## Aufgabe

Beobachte das Fahrverhalten des Autos mit einer Brennstoffzelle und schlieÙe auf deren Eigenschaften.

## Aufbau



## Benötigte Geräte

- 1 Elektroauto
- 1 Grundeinheit
- 1 reversible Brennstoffzelle
- 1 Spannungsmessgerät
- 1 Widerstandsmodul 3-fach
- 2 Widerstands-Steckelemente  $10\Omega$
- Stoppuhr

## Vorbereitung

Für den Versuch wird ausreichend Platz benötigt (mind.  $2 \times 2 \text{ m}$ ). Kippe die Vorderachse des Autos nach links, damit beim Fahren eine Kreisbahn entsteht. Markiere die Start-/Ziellinie des Autos auf der Kreisbahn (zum Beispiel mit Klebeband). Produziere mit der reversiblen Brennstoffzelle  $12 \text{ ml}$  Wasserstoff (siehe Experiment 6.1).

## Durchführung

1. Miss die Leerlaufspannung  $U_0$  an der Brennstoffzelle nach der Produktion von  $12 \text{ ml}$  Wasserstoff und trage Deinen Messwert in die Tabelle ein.
2. Setze die Brennstoffzelle auf das Auto und verbinde zunächst ein Kabel.
3. Bringe das Auto an die Startlinie und verbinde kurz vor dem Absetzen das zweite Kabel.
4. Miss die Zeit, die das Auto für 4 Umrunden benötigt und führe die Messung mehrmals hintereinander durch, ohne das Auto anzuhalten. Trage Deine Werte in die Tabelle ein.
5. Lasse das Auto mindestens  $5 \text{ min}$  fahren und notiere Deine Beobachtungen.

**Hinweis:** Achte bei dem Versuch unbedingt darauf, dass das Auto nirgends anstossen kann, da die Achsen ansonsten beschädigt werden könnten. Halte das Auto vor dem Losfahren einen kurzen Moment fest, da es sonst kippen könnte.



## 5.5 Betrieb des Elektroautos mit einer Brennstoffzelle

## Auswertung

1. Berechne jeweils die Zeit für 4 Runden und trage deine Werte in die Tabelle ein.
2. Vergleiche den Betrieb des Autos mit der Brennstoffzelle im Gegensatz zu herkömmlichen Akkumulatoren wie im vorherigen Experiment.
3. Informiere Dich über den Gebrauch von Brennstoffzellen in der Automobilbranche. Welche Formen der Speicherung von Wasserstoff gibt es?

## Messwerte

	4 Runden	8 Runden	12 Runden	16 Runden	20 Runden	Beobachtung nach 5 min (Zeit nach der das Auto stoppt)
<b>Brennstoffzelle: <math>U_0 = 1,4 \text{ V}</math></b>						
Zeit in s	34	72	112	154	198	kontinuierliche Abnahme der Geschwindigkeit Stoppt nach ca. 3:40 min
Zeit für 4 Runden	34	38	40	42	44	

## Auswertung

2.

Die Geschwindigkeit des Elektroautos ist deutlich geringer als beim Betrieb mit den Akkus. Dies liegt vor allem an der niedrigen Nennspannung und –stromstärke der Brennstoffzelle. Die Speicherkapazität ist ebenso begrenzt, weshalb das Auto im Versuch schon nach etwa dreieinhalb Minuten stoppt.

2.

Die Brennstoffzellentechnologie wird als Hybridantrieb in Elektroautos benutzt (z.B. in Kombination mit Rekuperation (Nutzung der Bremsenergie)).

Die Speicherung von Wasserstoff erfolgt zum Beispiel durch Druckwasserstoffspeicherung oder Metallhydrid-Speicherung

leXsolar GmbH  
Strehleener Straße 12-14  
01069 Dresden / Germany

Telefon: +49 (0) 351 - 47 96 56 0  
Fax: +49 (0) 351 - 47 96 56 - 111  
E-Mail: [info@lexsolar.de](mailto:info@lexsolar.de)  
Web: [www.lexsolar.de](http://www.lexsolar.de)