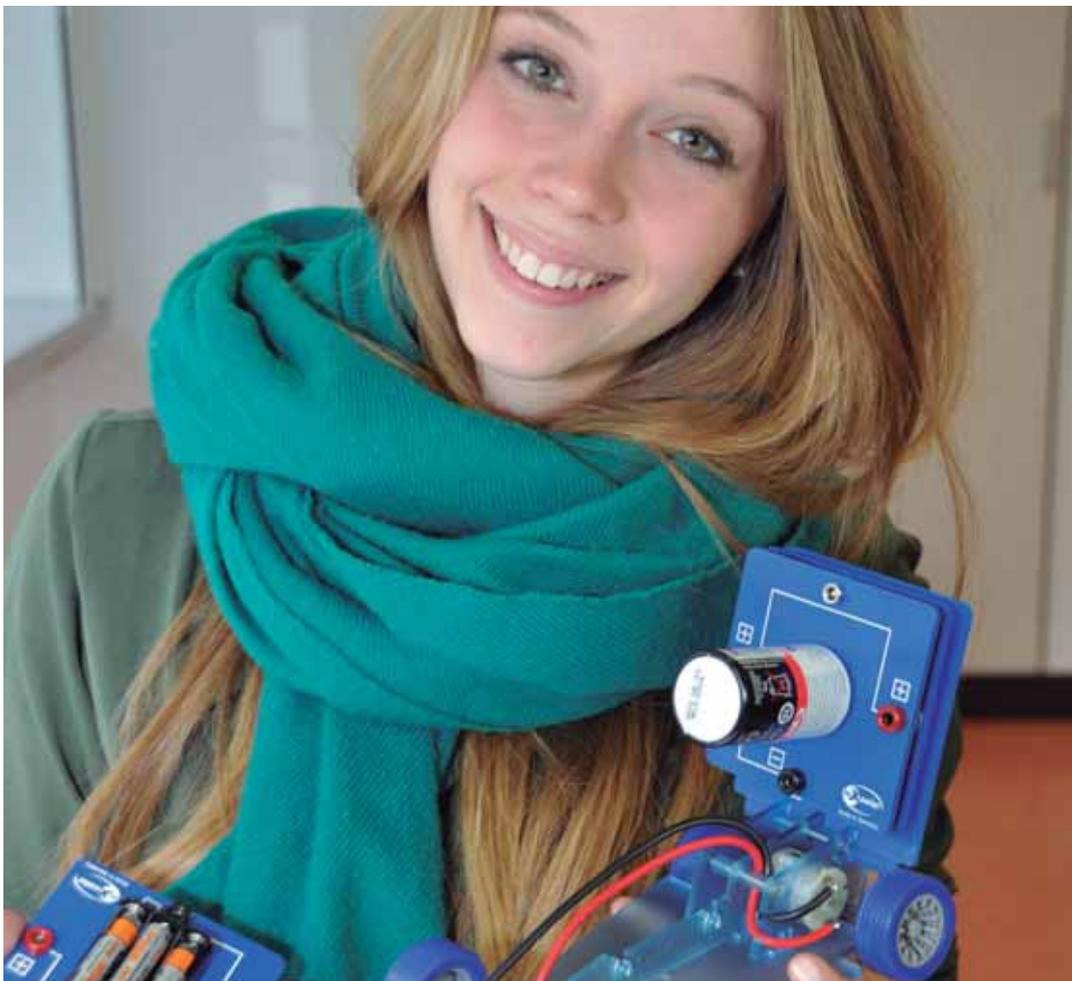
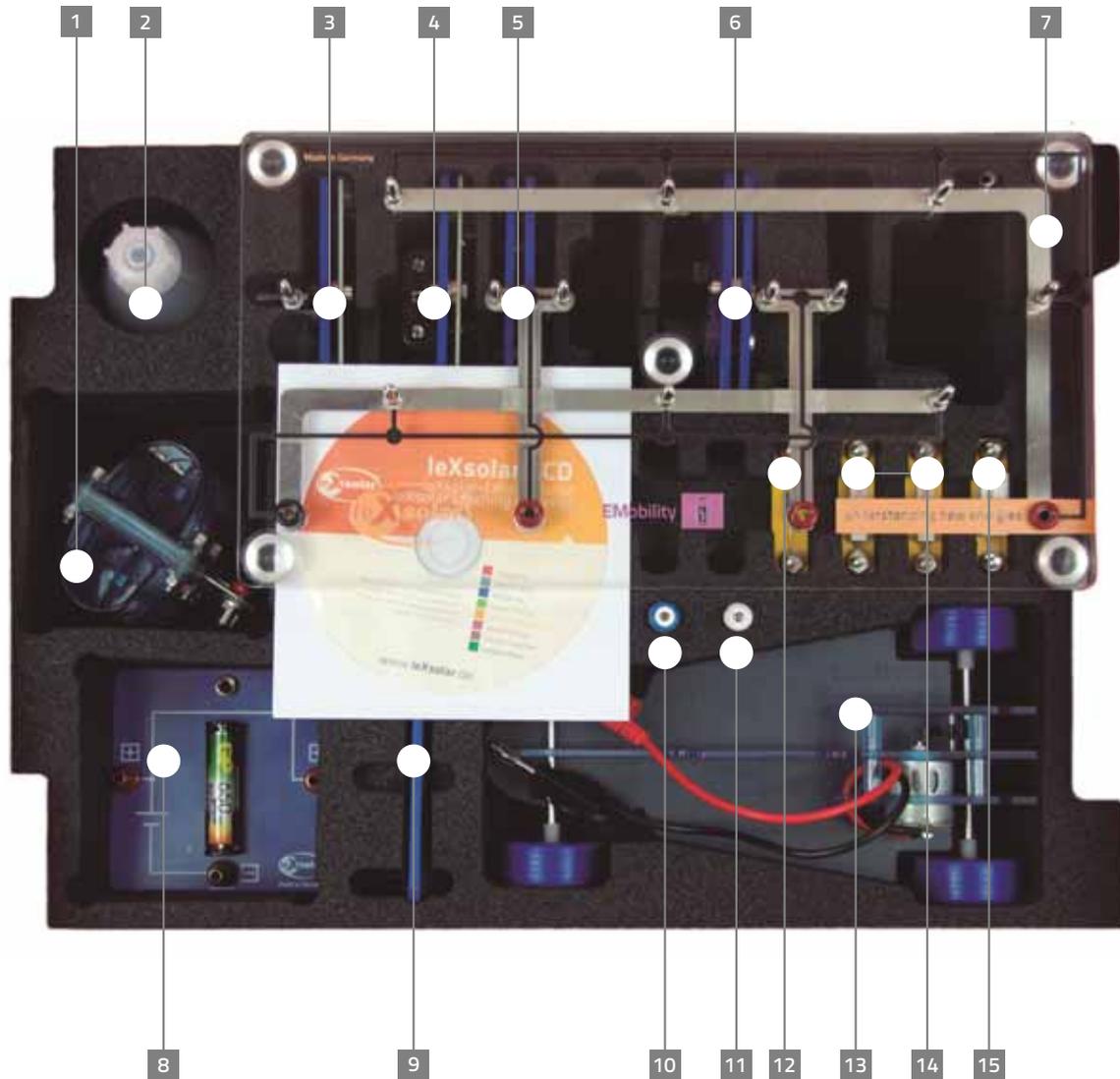


# leXsolar-EMobility Large



Lehrerheft

Layout diagram leXsolar-EMobility Large  
 Item-No.1802  
 Bestückungsplan leXsolar-EMobility Large  
 Art.-Nr.1802



- |  |   |   |
|--|---|---|
| <p><b>1</b> L2-06-067 Reversible Fuel cell Pro<br/>L2-06-067 Reversible Brennstoffzelle Pro</p> <p><b>2</b> 1800-15 Distilled water (100 ml)<br/>1800-15 Destilliertes Wasser (100 ml)</p> <p><b>3</b> 1118-11 Capacitor module Pro<br/>1118-11 Kondensatormodul Pro</p> <p><b>4</b> 1118-09 Battery module NiMH 3xAAA Pro<br/>1118-09 Akkumodul NiMH 3xAAA Pro</p> <p><b>5</b> 1800-01 Resistor module (triple) Pro<br/>1800-01 Widerstandsmodul 3-fach Pro</p> | <p><b>6</b> 1100-62 Potentiometer module 110 Ohm Pro<br/>1100-62 Potentiometermodul 110 Ohm Pro</p> <p><b>7</b> 1801-07 leXsolar-Base unit EMobility<br/>1801-07 leXsolar Grundeinheit EMobility</p> <p><b>8</b> 1800-08 Battery module holder 1xAAA Pro with L2-04-021 NiMH battery AAA<br/>1800-08 Akkuhalterungsmodul 1xAAA Pro mit L2-04-021 NiMH-Akku AAA</p> <p><b>9</b> Battery adapter for <b>13</b><br/>Akku-Adapter für <b>13</b></p> | <p><b>10</b> 1801-06 LiFePo-battery AAA<br/>1801-06 LiFePo-Akku AAA</p> <p><b>11</b> L2-04-102 NiZn-battery AAA<br/>L2-04-102 NiZn-Akku AAA</p> <p><b>12</b> 1800-04 Resistor plug element 100 Ohm<br/>1800-04 Widerstands-Steckelement 100 Ohm</p> <p><b>13</b> 1801-02 Electric model car with <b>9</b><br/>1801-02 Elektro-Modellfahrzeug mit <b>9</b></p> <p><b>14</b> 2x1800-05 Resistor plug element 10 Ohm<br/>2x1800-05 Widerstands-Steckelement 10 Ohm</p> <p><b>15</b> 1800-03 Resistor plug element 1 Ohm<br/>1800-03 Widerstands-Steckelement 1 Ohm</p> |
|--|---|---|

Version number  
 Versionsnummer

L3-03-166\_16.03.2016

# leXsolar-EMobility Large

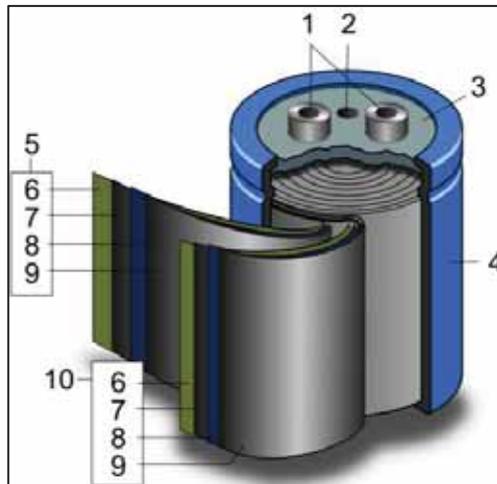
## Lehrerheft

### Inhalt

<b>1.</b>	<b>Historie .....</b>	<b>5</b>
<b>2.</b>	<b>Grundlagen zur Speichertechnologie .....</b>	<b>7</b>
2.1.	Primärbatterien und Sekundärbatterien .....	8
2.1.1.	Der Nickel-Metall-Hydrid-Speicher (NiMH).....	9
2.1.2.	Der Nickel-Zink-Akku (NiZn).....	11
2.1.3.	Der Blei-Akku (Pb).....	12
2.1.4.	Die Lithium-Ionen-Technologie (Li-Ion) .....	14
2.2.	Kondensatoren .....	17
2.3.	Brennstoffzellen.....	18
2.3.1.	Wasserstoffproduktion und –speicherung .....	19
2.3.2.	Aufbau und Wirkungsweise .....	21
2.3.3.	Eigenschaften und Anwendung.....	22
2.4.	Vor- und Nachteile verschiedener Speichertechnologien .....	23
<b>3.</b>	<b>Grundlagen Batterietechnologie .....</b>	<b>25</b>
3.1.	Die Nennspannung von Spannungsquellen .....	25
3.2.	Der Innenwiderstand einer Spannungsquelle .....	25
3.3.	Die Vierpunktmessung.....	26
3.4.	Die Speicherkapazität und Energiegehalt verschiedener Akku-Module.....	27
3.5.	Der Wirkungsgrad von Batterien und Brennstoffzellen .....	28
3.6.	Temperaturverhalten eines Akkumulators.....	30
3.7.	U-I-Kennlinien.....	31
3.8.	Ladeverfahren .....	31
3.9.	Anwendungsbeispiele.....	35
3.9.1.	Packaging .....	35
3.9.2.	Anwendung PKW.....	36
3.9.3.	Energiekostenvergleich von Netzstrom und Batterien .....	39
3.9.4.	Speicherkapazität von Energieversorgungsnetzen .....	40

<b>4.</b>	<b>Das Experimentiersystem leXsolar-EMobility Large .....</b>	<b>41</b>
4.1.	Bezeichnung und Handhabung der Experimentiergeräte .....	41
4.2.	Allgemeine Hinweise zum sicheren Umgang mit Akkus und Ladegeräten .....	48
4.3.	Musterlösungen der Experimente .....	49
	1.1 Das ohmsche Gesetz .....	50
	1.2 Reihenschaltung von ohmschen Widerständen .....	50
	1.3 Parallelschaltung von ohmschen Widerständen .....	50
	2.1 Die Nennspannung und Kapazität von Spannungsquellen .....	50
	2.2 Die Vierpunkt-Messung .....	50
	2.3 Der Innenwiderstand von Spannungsquellen .....	50
	2.4 Reihenschaltung von Spannungsquellen.....	50
	2.5 Die Speicherkapazität eines Akku-Moduls.....	50
	2.6 Der Energiegehalt verschiedener Akkumodule.....	50
	2.7 Der $R_i$ -Wirkungsgrad eines Akkumoduls .....	50
	2.8 Der Gesamtwirkungsgrad einer Batterie .....	50
	2.9 Temperaturverhalten der Lithium-Polymerzelle .....	50
	3.1 Das Ladeverhalten des Kondensators .....	50
	3.2 Das Entladeverhalten des Kondensators.....	50
	4.1 U-I-Kennlinie des einfachen NiMH-Akkumoduls .....	50
	4.2 U-I-Kennlinie des NiZn-Akkumoduls .....	50
	4.3 U-I-Kennlinie des LiFePo-Akkumoduls .....	50
	4.4 U-I-Kennlinie des Blei-Akkumoduls.....	50
	4.5 U-I-Kennlinie des Lithium-Polymer-Akkumoduls .....	50
	4.6 U-I-Kennlinie des dreifachen NiMH-Akkumoduls.....	50
	5.1 Das Ladeverfahren des NiMH-Akkus.....	50
	5.2 Das Ladeverfahren des NiZn-Akkus .....	50
	5.3 Das Ladeverfahren des LiFePo-Akkus .....	50
	5.4 Das Ladeverfahren des Blei-Akkus.....	50
	5.5 Das Ladeverfahren des LiPo-Akkus .....	50
	5.6 Das Entladeverfahren eines Akkumoduls .....	50
	6.1 Die Wasserstoffproduktion der reversiblen Brennstoffzelle .....	50
	6.2 Die Kennlinie des Elektrolyseurs .....	50
	6.3 Der Wasserstoffverbrauch einer Brennstoffzelle .....	50
	6.4 Die Kennlinie der Brennstoffzelle .....	50
	6.5 Der Wirkungsgrad der Brennstoffzelle .....	50
	7.1 Betrieb des Elektroautos mit verschiedenen Akkumodulen.....	50
	7.2 Betrieb des Elektroautos mit einer Brennstoffzelle .....	50

*Elektrode-dielektrische Schicht-Elektrolyt-dielektrische Schicht-Elektrode.* Um eine größere Oberfläche zu erreichen werden die Supercaps in mehrlagigen Schichten oder in aufgewickelter Form ausgeführt.



1. Anschlüsse
2. Sicherheitsventil,
3. Abdichtscheibe
4. Becher
5. Positive Elektrode mit 6.
6. Separator
- 7., 8., 9. Doppelseitige Elektrode mit zentralem Kollektor
10. Negative Elektrode

Abb.2.14: Schematischer Aufbau eines Supercap-Kondensators <sup>16</sup>

Die Kapazität eines Supercaps setzt sich zusammen aus der Doppelschichtkapazität und einer sogenannten Pseudokapazität. Die Doppelschichtkapazität ergibt sich aus der Potentialdifferenz der Elektroden, die im Falle der Supercaps durch die chemische Reaktion im Elektrolyten zwischen den Kondensatorplatten zustande kommt. Die Pseudokapazität wird hervorgerufen durch eine Redoxreaktion neutraler Moleküle an der Elektrode und trägt ebenfalls zur Gesamtkapazität des Supercaps bei.

### *Eigenschaften und Anwendung*

Mit den Supercaps sind Kapazitäten bis zu mehreren tausend Farad realisierbar. Dennoch liegt deren Gesamtkapazität immer noch weit unter der einer Batterie (<10%). Die maximale Spannung von Einzelkondensatoren liegt meist unter 2,7V, der Wirkungsgrad hingegen bei über 90%. Supercaps sind in der Lage, sehr schnell hohe Leistungen abzugeben und werden daher weniger als Energie-, sondern eher als Leistungsspeicher genutzt. Damit eignen sich die Supercaps vor allem im Transportbereich zur Bereitstellung von Starterenergie, zur Stützung von Versorgungssystemen, um kurzfristige Leistungsausfälle zu kompensieren oder zum Ausgleich kurzzeitiger Leistungsschwankungen.

## **2.3. Brennstoffzellen**

Unter dem Begriff Brennstoffzelle werden Systeme verstanden, die die chemische Energie aus einem Brennstoff, zum Beispiel Wasserstoff unter Zufuhr von Sauerstoff in elektrische Energie umwandeln. Je nach Art des Brennstoffs oder Elektrolyts wird unterschieden

<sup>16</sup> [wikimedia.org](https://de.wikipedia.org)

zwischen verschiedenen Bauformen von Brennstoffzellen. Die im Experimentiersystem enthaltene PEM-Brennstoffzelle arbeitet mit Wasserstoff als Brennstoff. Dieser kann durch verschiedene Verfahren gewonnen und gespeichert werden.

### 2.3.1. Wasserstoffproduktion und –speicherung

Der Vorteil von Wasserstoff als Speichermedium ist die nahezu unbegrenzte Verfügbarkeit auf der Erde. Allerdings liegt das Element fast ausschließlich in gebundener Form vor und muss zunächst isoliert werden. Neben der Wasserelektrolyse sind thermische Verfahren der heutige Standard bei der Wasserstofferzeugung. Bei den thermischen Verfahren werden vor allem fossile Energieträger genutzt, weshalb es sich nur bei der Wasserelektrolyse unter Nutzung erneuerbarer Energien um eine nachhaltige und klimaneutrale Wasserstoffproduktion handelt.

Im industriellen Maßstab finden vor allem Dampfreforming-Prozesse Anwendung. Dabei werden langkettige Kohlenwasserstoffe mit einem hohen Wasserstoffanteil reformiert und Wasserstoff kann nach einem nachgeschalteten Aufbereitungsschritt als Reinstgas entnommen werden. Dieser industrielle



Abb.2.15: Steam-Reformer, Anlage zur Erzeugung von Wasserstoff aus Erdgas<sup>17</sup>

Wasserstoff entsteht meist als Nebenprodukt und wird häufig sofort wieder verbraucht. Ein weiteres Verfahren zur Erzeugung von Wasserstoff ist die Wasser-Elektrolyse. Bei der Elektrolyse handelt es sich um eine Redoxreaktion, hervorgerufen durch elektrischen Strom. Der Prozess ist seit über 200 Jahren bekannt und ist damit keine grundlegend neue Technologie. In den letzten Jahrzehnten wurden dazu drei grundlegende Verfahren entwickelt:

1. Alkalische Elektrolyse
2. PEM-Elektrolyse
3. Hochtemperatur-Elektrolyse

Bei der im Experimentiersystem enthaltenen reversiblen Brennstoffzelle handelt es sich um den Prozess der PEM-Elektrolyse. In einem PEM-Elektrolyseur wird destilliertes Wasser durch elektrischen Strom in Wasserstoff und Sauerstoff gespalten. Der Elektrolyseur besteht aus zwei Elektroden mit einer Edelmetallbeschichtung, die durch eine protonendurchlässige Polymermembran (PEM-Proton Exchange Membrane) voneinander getrennt sind.

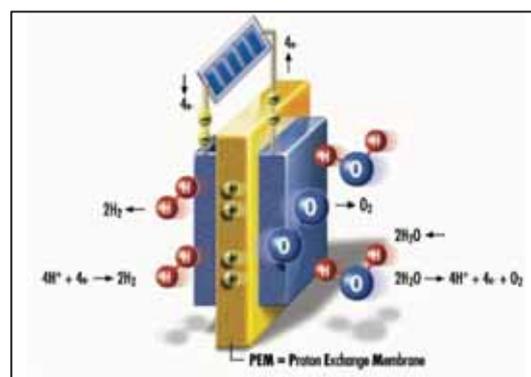


Abb.2.16: Schematischer Aufbau eines PEM-Elektrolyseurs<sup>18</sup>

<sup>17</sup> [www.westfalen-ag.de](http://www.westfalen-ag.de)

<sup>18</sup> [www.marqumtech.de](http://www.marqumtech.de)

### 3. Grundlagen Batterietechnologie

#### 3.1. Die Nennspannung von Spannungsquellen

Elektrochemische Wandler arbeiten nach einem einfachen Prinzip. Sie bestehen aus einer Anode, einer Kathode und einem Elektrolyten. Bei Batterien wird die Spannung an den Elektroden durch einen externen Elektronenfluss ab- (Entladeprozess) bzw. aufgebaut (Ladeprozess). Die resultierende maximale Spannung ergibt sich je nach Batterietyp aus den Reaktionsmaterialien. Alle Batterietypen weisen neben einer maximalen Leerlaufspannung eine minimale Leerlaufspannung auf, die nicht unterschritten werden darf. Unterhalb dieser Spannung kann die Batterie keine Leistung mehr abgeben. Die Nennspannung ist eine nominelle Angabe und liegt immer unterhalb der maximalen Leerlaufspannung und oberhalb der minimalen Leerlaufspannung.

Generell sollten Akkus nicht unterhalb von 20% des maximalen Ladezustands betrieben werden. Der Ladezustand von Batterien kann in den meisten Fällen anhand der Leerlaufspannung bestimmt werden (siehe Abb.3.1).

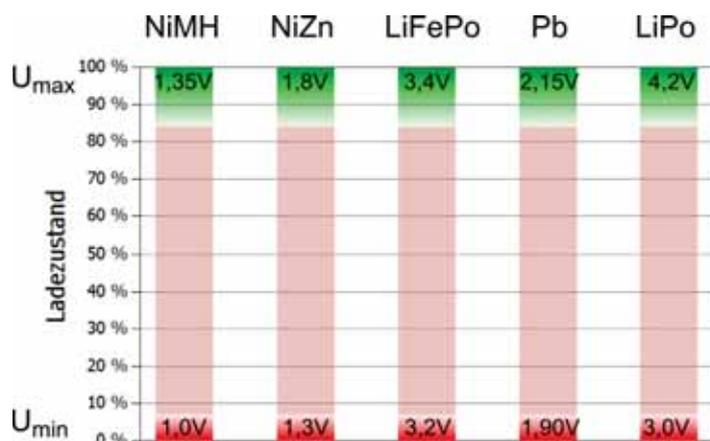


Abb.3.1: Der Ladezustand von Akkumodulen

#### 3.2. Der Innenwiderstand einer Spannungsquelle

Eine weitere Kenngröße zur Qualifizierung einer Batterie ist der Innenwiderstand  $R_i$ . Dieser ist ausschlaggebend für die maximale Leistung der Batterie, deren Wirkungsgrad und wird auch als Indikator für den Alterungszustand der Batterie verwendet. Der Innenwiderstand ist abhängig von verschiedenen Parametern wie Temperatur, Alterung der Zelle, Größe der Zelle und Ladezustand. Maßgeblich für die Größe des Innenwiderstands ist zunächst die reaktive Fläche am Elektrolyten. Je größer die Fläche, bzw. je größer das Volumen, desto kleiner ist der Innenwiderstand. Da sich mit der Alterung die Reaktionsmaterialien verbrauchen, steigt auch der Innenwiderstand mit der Zeit.

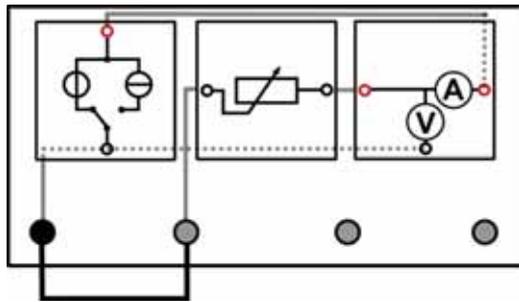
Je nach Anwendung und Einsatzbereich kann anhand des Innenwiderstands eine Zustandsbestimmung durchgeführt werden. Zuerst wird dafür der Innenwiderstand  $R_0$  (BOL- Begin of Life) der Akkuzelle direkt im Neuzustand vor Beginn der Anwendung ermittelt. Dieser Innenwiderstandwert dient als Referenzwert. Durch

## 1.1 Das ohmsche Gesetz

### Aufgabe

Untersuchen Sie das ohmsche Gesetz mithilfe verschiedener Widerstände.

### Aufbau



### Benötigte Geräte

- 1 Grundeinheit
- 1 ChargerModul
- 1 Potentiometermodul
- 1 AV-Modul
- 1 Laborkabel

### Durchführung

1. Bauen Sie den Versuch entsprechend dem Schaltplan auf. Das ChargerModul wird im Versuch um 90° gedreht aufgesteckt (siehe Skizze). Verwenden Sie das ChargerModul im Festspannungsmodus mit 6V. Hinweise zur Handhabung finden Sie auf Seite 41.
2. Messen Sie den Strom  $I$  und die Spannung  $U$  bei verschiedenen Widerständen  $R$  am Potentiometer. Entnehmen Sie die Widerstände der Messwertetabelle. Verwenden Sie das AV-Modul im Strom-Spannungs-Modus. Hinweise zur Handhabung finden Sie auf Seite 43.
3. Notieren Sie Ihre Messwerte (siehe Tabelle) und berechnen Sie jeweils den Quotienten  $U/I$ .

### Messwerte

$R$ ( $\Omega$ )	100	80	60	40	20
$U$ (V)	5,9	5,9	5,9	5,9	5,9
$I$ (mA)	61,5	74,7	97,3	145,1	278,7
$U/I$ ( $\Omega$ )	95,9	79,0	60,6	40,7	21,2

### Auswertung

1. Benennen Sie den Zusammenhang zwischen dem Widerstand  $R$  und dem Quotienten  $U/I$ . Leiten Sie hieraus eine Gesetzmäßigkeit ab.

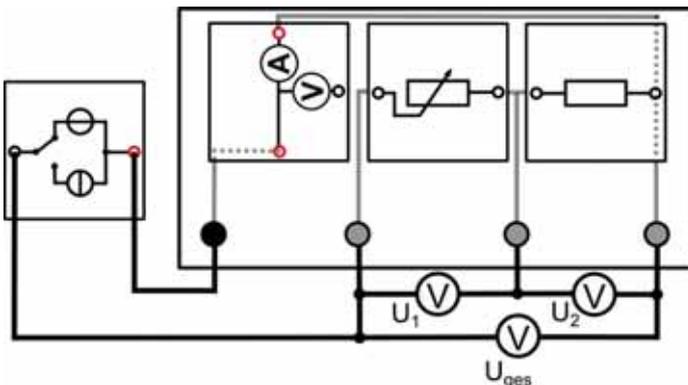
Der Widerstand  $R$  stimmt mit dem Quotienten  $U/I$  überein. Daraus lässt sich die Gleichung für den allgemeinen ohmschen Widerstand  $R$  ableiten:  $R=U/I$ .

## 1.2 Reihenschaltung von ohmschen Widerständen

### Aufgabe

Untersuchen Sie die Reihenschaltung von ohmschen Widerständen

### Aufbau



### Benötigte Geräte

- 1 Grundeinheit
- 1 ChargerModul
- 1 Potentiometermodul
- 1 Widerstandsmodul, 3-fach  
( $R=100\Omega$ )
- 1 Widerstandssteckelement
- 1 AV-Modul
- 4 Laborkabel

*Zusätzlich benötigt:*

- 1 Spannungsmessgerät

### Durchführung

1. Bauen Sie den Versuch entsprechend dem Schaltplan auf. Verwenden Sie das ChargerModul im Festspannungsmodus mit 6V. Hinweise zur Handhabung finden Sie auf Seite 41.
2. Stellen Sie das Potentiometer auf einen Widerstand von  $R_{Pot}=100\Omega$  ein und verwenden Sie das Widerstandssteckelement von  $R_S=100\Omega$  auf dem dreifachen Widerstandsmodul.
3. Messen Sie jeweils den Strom  $I$  (am AV-Modul), die Spannung über beiden Widerständen ( $U_{ges}$ ) und die Einzelspannung ( $U_1, U_2$ )

**Hinweis:** Das AV-Modul wird bei diesem Versuch um  $90^\circ$  gedreht aufgesteckt (siehe Skizze). Es wird zum Messen der Stromstärke im Stromstärke-Modus betrieben. Falls kein zusätzliches Spannungsmessgerät verfügbar ist, kann die Spannung auch mit dem AV-Modul im Spannungsmodus gemessen werden. Dazu muss der Steckplatz des AV-Moduls elektrisch überbrückt werden mithilfe eines Kabels. Hinweise zur Handhabung des AV-Moduls finden Sie auf Seite 43.

4. Wiederholen Sie die Messung für verschiedene Widerstandswerte am Potentiometer  $R_{Pot}$  (siehe Tabelle).
5. Notieren Sie ihre Messwerte in der Tabelle.

### Messwerte

$R_S$ ( $\Omega$ )	100	80	60	40	20
$U_1$ (V)	3,0	2,7	2,3	1,8	1,0
$U_2$ (V)	3,0	3,3	3,7	4,2	5,0
$U_{ges}$ (V)	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
$I$ (mA)	30,7	33,6	37,7	43,0	50,7
$R_{ges}=U_{ges}/I$ ( $\Omega$ )	195,4	178,6	159,2	139,5	118,3



## 2.5 Die Speicherkapazität eines Akku-Moduls

## Auswertung

2.

Ladezustand zu Beginn:  $U_0(1) = 3,34V \sim 70\%$ Ladezustand zum Ende:  $U_0(2) = 3,23V \sim 15\%$ 

Kapazität zu Beginn:

$$\frac{x}{200mAh} = \frac{70}{100} \rightarrow x = 140mAh$$

Kapazität zum Ende:

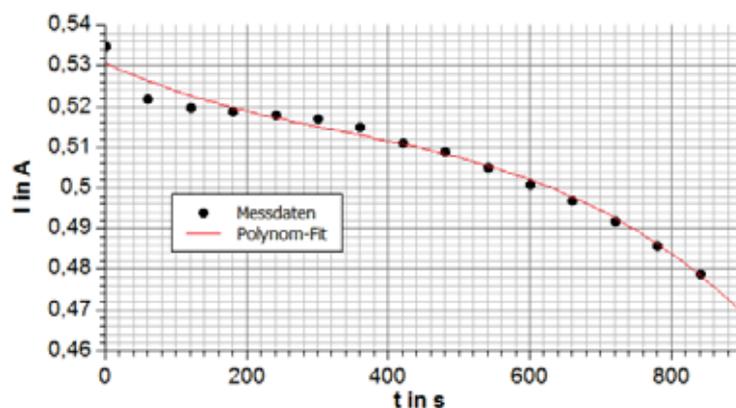
$$\frac{x}{200mAh} = \frac{15}{100} \rightarrow x = 30mAh$$

Kapazitätsverlust:  $140mAh - 30mAh = \underline{110mAh}$ 

3.

Durch den relativ flachen Verlauf der Kurve zu Beginn des Entladeprozesses ist es schwierig, den Ladezustand allein aus der Spannungsmessung zu ermitteln. Gegen Ende, wenn die Kurve steiler abfällt, kann aus der Spannung wieder einfacher auf den Ladezustand geschlossen werden.

4. Mit Polynom-Fit-Funktion dritten Grades:



Ladung aus Integral über Fit-Funktion:

$$Q = \int_{t_1}^{t_2} I dt = 455,8As$$

Kapazitätsverlust, ermittelt in 1.:

$$Q = 110mAh \equiv 396 As$$

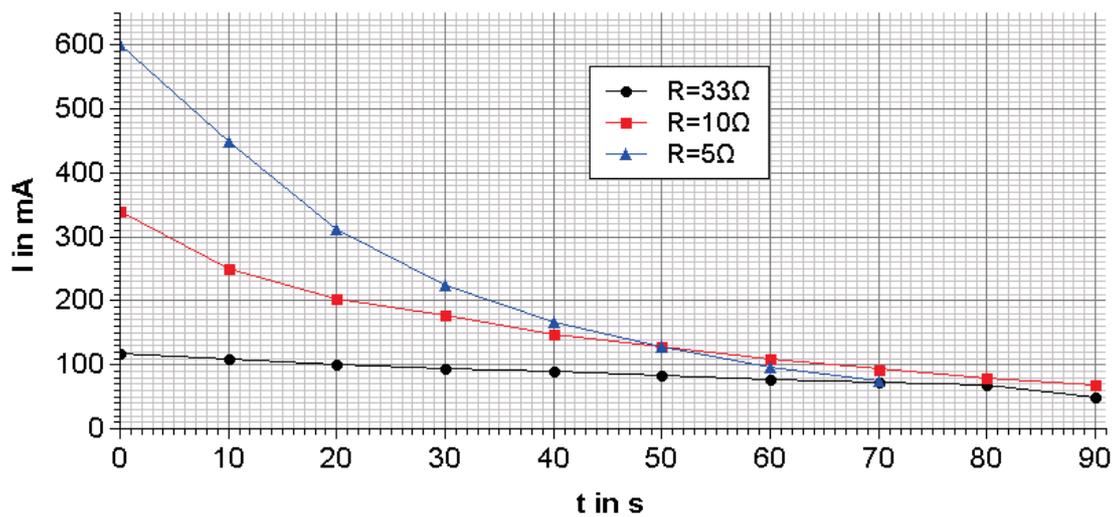
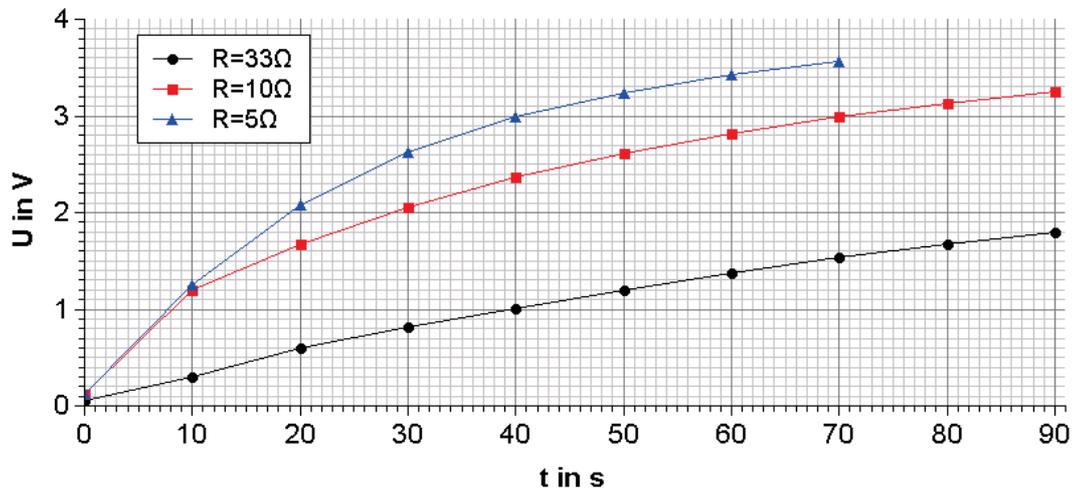
Der tatsächliche Kapazitätsverlust beim Entladen, ermittelt durch das Integral, liegt etwas höher als bei der ungenaueren Messung über die Leerlaufspannung (siehe 3. → Ladezustandsbestimmung!).



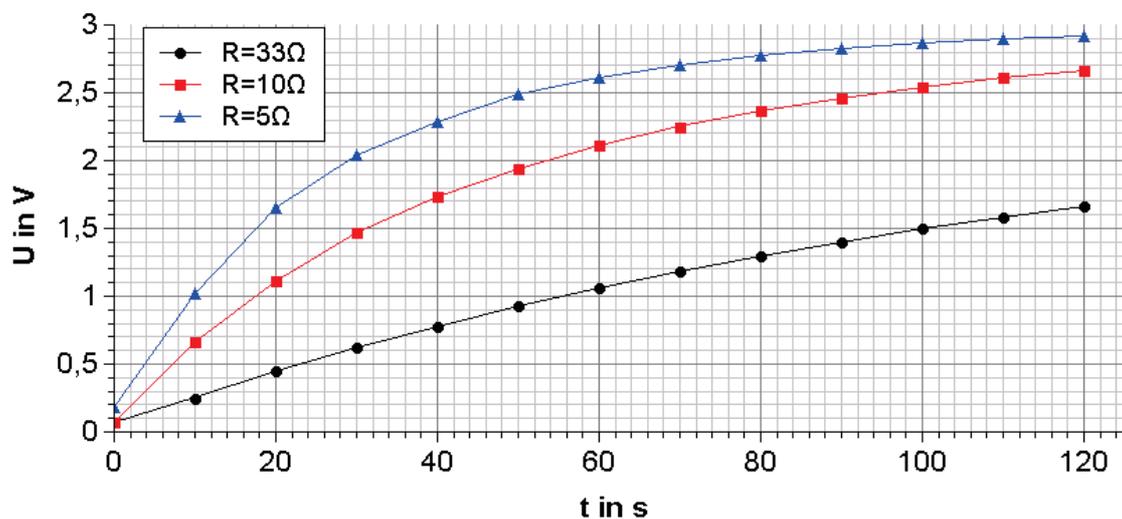
### 3.1 Das Ladeverhalten des Kondensators

#### Diagramme

Variante 1: Laden im Supercap-Modus (zusätzlich  $R=33\Omega$  aufgetragen)



Variante 2: Laden im Festspannungs-Modus (zusätzlich  $R=33\Omega$  aufgetragen)





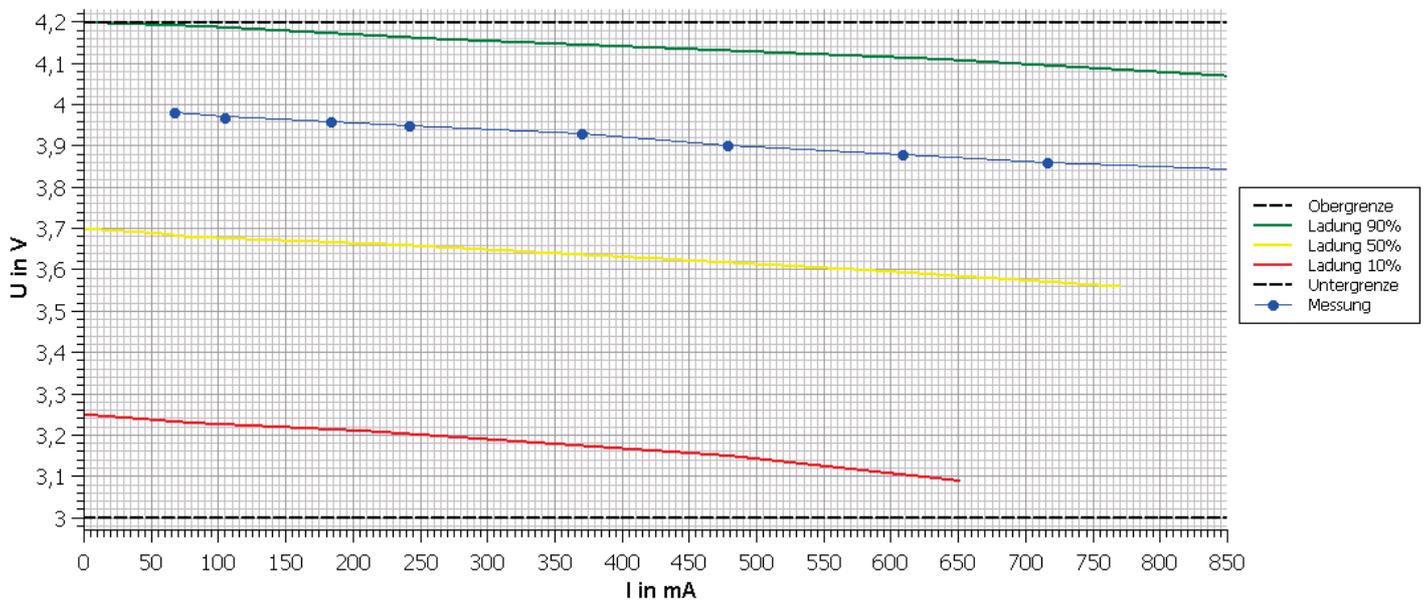
### 4.5 U-I-Kennlinie des Lithium-Polymer-Akkumoduls

#### Messwerte

$U_0 = 3,99V$

$R_{Pot}$ in $\Omega$	60	40	20	15	10	8	6	5	4
$U_{Last}$ in V	3,98	3,97	3,96	3,95	3,93	3,90	3,88	3,86	3,84
$I_{Last}$ in mA	67	105	183	242	370	478	608	716	870

#### Diagramme



#### Auswertung

2.

Ladezustand: etwa 80%

Restkapazität:

$$\frac{x}{980mAh} = \frac{80}{100} \rightarrow x = \underline{\underline{784mAh}}$$



## 4.5 U-I-Kennlinie des Lithium-Polymer-Akkumoduls

### Auswertung

3.
  - Elektrofahrzeuge
  - Modellbau
  - Mobiltelefone
  - Elektronische Kleingeräte wie MP3-Player oder Laptops
  - Ortsfeste Kraftwerks-Energiespeicher
  
4.
  - Häufiges Nachladen ohne Überladung (flache Entladezyklen)
  - Hochwertige Elektronik des Batteriemanagementsystems
  - Lagerung eher kühl
  - Betrieb im optimalen Temperaturbereich
  - Keine Lagerung im vollen Zustand (idealerweise bei etwa 50% Restkapazität)



## 7.2 Betrieb des Elektroautos mit einer Brennstoffzelle

## Auswertung

1. Vergleichen Sie den Betrieb des Autos mit der Brennstoffzelle mit herkömmlichen Akkumulatoren wie im vorherigen Experiment.
2. Informieren Sie sich über den Gebrauch von Brennstoffzellen in der Automobilbranche. Gehen Sie dabei auch auf die Speicherung von Wasserstoff ein.

## 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

1.

Viel langsamer als Akkumulatoren (kleinere Betriebsspannung)

Nicht so viel Speicherkapazität

Strom wird erzeugt durch Reaktion mit Wasserstoff

2.

Wird üblicherweise als Hybridantrieb in Elektroautos benutzt (z.B. in Kombination mit Akkumulator)

Rekuperation (Nutzung der Bremsenergie)

Druckwasserstoffspeicherung, Metallhydridspeicherung

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)