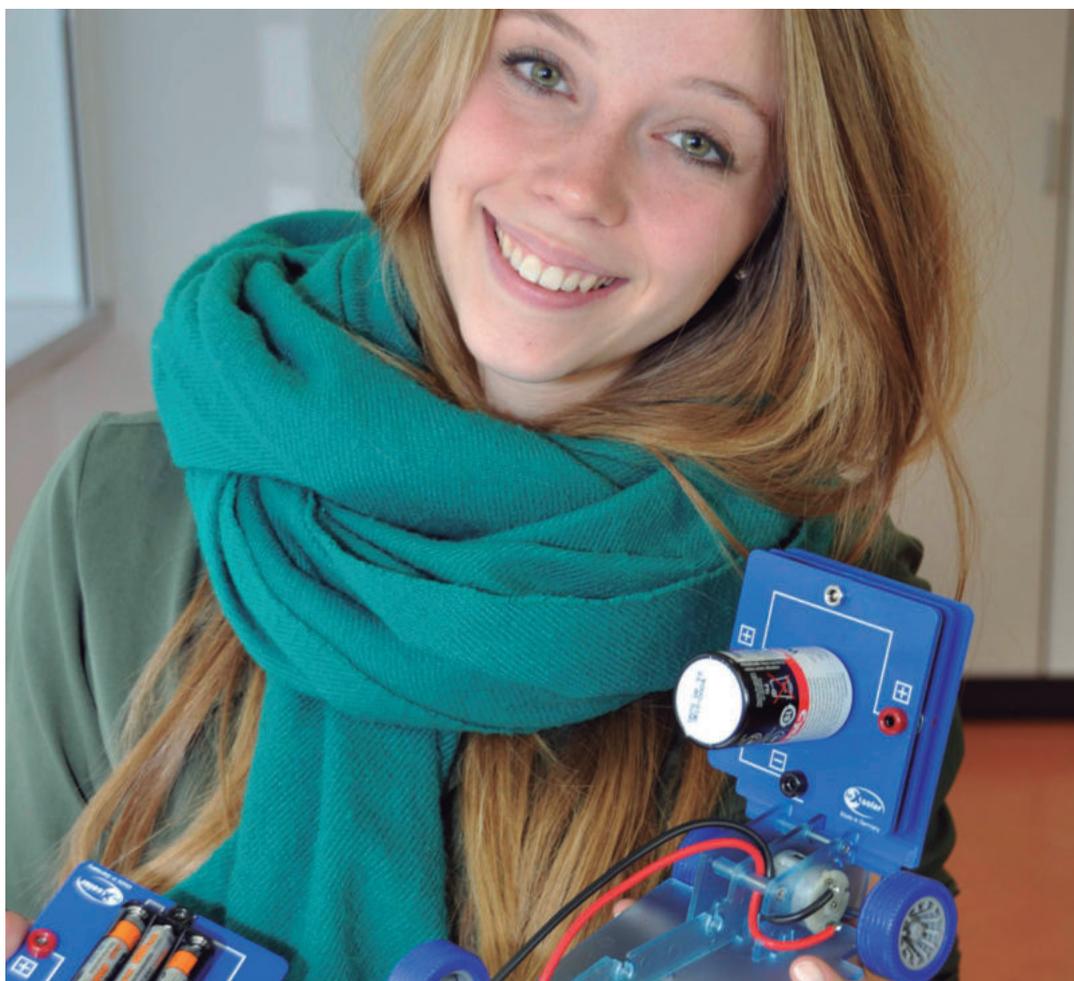
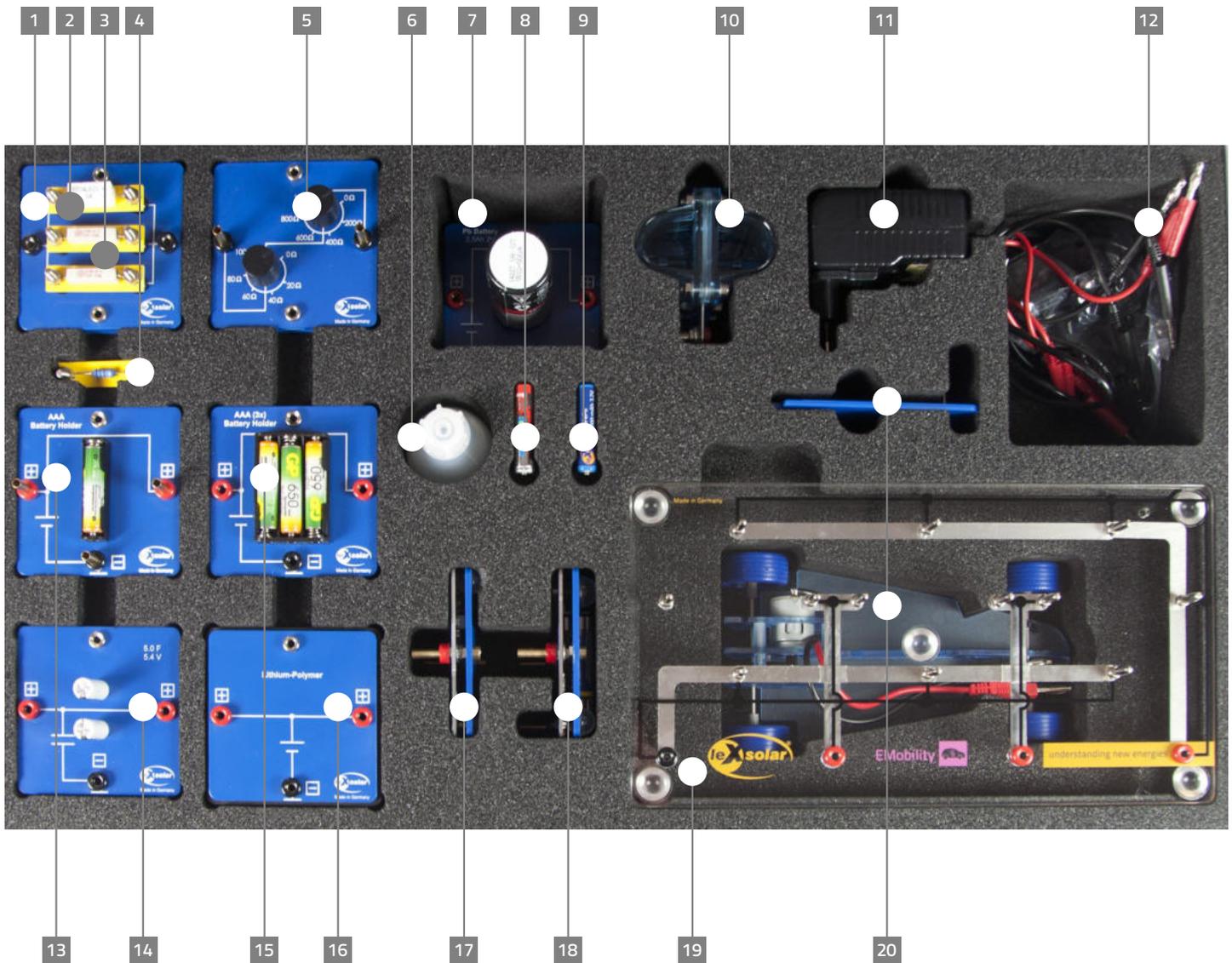


# leXsolar-EMobility Ready-to-go



Lehrerheft

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



- |   |   |  |
|---|---|--|
| <p><b>1</b> 1800-01 Resistor module (triple) Pro<br/>1800-01 Widerstandsmodul 3-fach Pro</p> <p><b>2</b> 1800-03 Resistor plug element 1 Ohm<br/>1800-03 Widerstands-Steckelement 1 Ohm</p> <p><b>3</b> 2x1800-05 Resistor plug element 10 Ohm<br/>2x1800-05 Widerstands-Steckelement 10 Ohm</p> <p><b>4</b> 1800-04 Resistor plug element 100 Ohm<br/>1800-04 Widerstands-Steckelement 100 Ohm</p> <p><b>5</b> 1100-62 Potentiometer module<br/>1100-62 Potentiometermodul</p> | <p><b>6</b> 1800-15 Distilled water<br/>1800-15 Destilliertes Wasser</p> <p><b>7</b> 1800-13 Lead (Pb)-battery module Pro<br/>1800-13 Blei-Akkumodul Pro</p> <p><b>8</b> L2-04-102 NiZn-battery AAA<br/>L2-04-102 NiZn-Akku AAA</p> <p><b>9</b> 1801-06 LiFePo-battery AAA<br/>1801-06 LiFePo-Akku AAA</p> <p><b>10</b> L2-06-067 Reversible Fuel cell Pro<br/>L2-06-067 Reversible Brennstoffzelle Pro</p> <p><b>11</b> Universal-power supply with <b>17</b><br/>Stromversorgungsgerät mit <b>17</b></p> <p><b>12</b> 2xL2-06-012/013 Test leads black/red<br/>2xL2-06-012/013 Messleitung schw./rot</p> <p><b>13</b> 1800-08 Battery module holder 1xAAA Pro<br/>with L2-04-021 NiMH battery AAA<br/>1800-08 Akkuhalterungsmodul 1xAAA Pro<br/>mit L2-04-021 NiMH-Akku AAA</p> | <p><b>14</b> 1118-11 Capacitor modul Pro<br/>1118-11 Kondensatormodul Pro</p> <p><b>15</b> 1118-09 NiMH Battery module 3xAAA Pro<br/>1118-09 Akkumodul NiMH 3xAAA Pro</p> <p><b>16</b> 1800-07 Lithium-polymer-battery module<br/>1800-07 Lithium-Polymer-Akkumodul Pro</p> <p><b>17</b> 9100-13 ChargerModule<br/>9100-13 ChargerModul</p> <p><b>18</b> 9100-03 AV-Module<br/>9100-03 AV-Modul</p> <p><b>19</b> 1801-07 leXsolar Base unit EMobility<br/>1801-07 leXsolar Grundeinheit EMobility</p> <p><b>20</b> 1801-02 Electric model car<br/>1801-02 Elektro-Modellfahrzeug</p> |
|---|---|--|

Version number  
 Versionsnummer

L3-03-167\_02.02.2017

# leXsolar-EMobility Ready-to-go

## Experimentierhandbuch

### Inhalt

<b>1.</b>	<b>Historie</b> .....	<b>6</b>
<b>2.</b>	<b>Grundlagen zur Speichertechnologie</b> .....	<b>8</b>
2.1.	Primärbatterien und Sekundärbatterien .....	9
2.1.1.	Der Nickel-Metall-Hydrid-Speicher (NiMH).....	10
2.1.2.	Der Nickel-Zink-Akku (NiZn).....	12
2.1.3.	Der Blei-Akku (Pb).....	13
2.1.4.	Die Lithium-Ionen-Technologie (Li-Ion) .....	15
2.2.	Kondensatoren .....	18
2.3.	Brennstoffzellen.....	19
2.3.1.	Wasserstoffproduktion und –speicherung .....	20
2.3.2.	Aufbau und Wirkungsweise .....	22
2.3.3.	Eigenschaften und Anwendung.....	23
2.4.	Vor- und Nachteile verschiedener Speichertechnologien .....	24
<b>3.</b>	<b>Grundlagen Batterietechnologie</b> .....	<b>26</b>
3.1.	Die Nennspannung von Spannungsquellen .....	26
3.2.	Der Innenwiderstand einer Spannungsquelle .....	26
3.3.	Die Vierpunktmessung.....	27
3.4.	Die Speicherkapazität und Energiegehalt verschiedener Akku-Module.....	28
3.5.	Der Wirkungsgrad von Batterien und Brennstoffzellen .....	29
3.6.	Temperaturverhalten eines Akkumulators.....	31
3.7.	U-I-Kennlinien.....	32
3.8.	Ladeverfahren .....	32
3.9.	Anwendungsbeispiele.....	36
3.9.1.	Packaging .....	36
3.9.2.	Anwendung PKW.....	37
3.9.3.	Energiekostenvergleich von Netzstrom und Batterien .....	40
3.9.4.	Speicherkapazität von Energieversorgungsnetzen .....	41

<b>4.</b>	<b>Das Experimentiersystem leXsolar-EMobility Ready-to-go</b> .....	<b>42</b>
4.1.	Bezeichnung und Handhabung der Experimentiergeräte .....	42
4.2.	Allgemeine Hinweise zum sicheren Umgang mit Akkus und Ladegeräten .....	49
4.3.	Musterlösungen der Experimente .....	50
	1.1 Das ohmsche Gesetz.....	51
	1.2 Reihenschaltung von ohmschen Widerständen .....	52
	1.3 Parallelschaltung von ohmschen Widerständen .....	54
	2.1 Die Nennspannung und Kapazität von Spannungsquellen .....	55
	2.2 Die Vierpunkt-Messung.....	58
	2.3 Der Innenwiderstand von Spannungsquellen .....	60
	2.4 Reihenschaltung von Spannungsquellen.....	63
	2.5 Die Speicherkapazität eines Akku-Moduls.....	65
	2.6 Der Energiegehalt verschiedener Akkumodule.....	68
	2.7 Der $R_i$ -Wirkungsgrad eines Akkumoduls .....	72
	2.8 Der Gesamtwirkungsgrad einer Batterie.....	75
	2.9 Temperaturverhalten der Lithium-Polymerzelle .....	79
	3.1 Das Ladeverhalten des Kondensators .....	82
	3.2 Das Entladeverhalten des Kondensators.....	86
	4.1 U-I-Kennlinie des einfachen NiMH-Akkumoduls .....	89
	4.2 U-I-Kennlinie des NiZn-Akkumoduls .....	92
	4.3 U-I-Kennlinie des LiFePo-Akkumoduls .....	95
	4.4 U-I-Kennlinie des Blei-Akkumoduls.....	98
	4.5 U-I-Kennlinie des Lithium-Polymer-Akkumoduls .....	101
	4.6 U-I-Kennlinie des dreifachen NiMH-Akkumoduls.....	104
	5.1 Das Ladeverfahren des NiMH-Akkus.....	107
	5.2 Das Ladeverfahren des NiZn-Akkus .....	110
	5.3 Das Ladeverfahren des LiFePo-Akkus .....	113
	5.4 Das Ladeverfahren des Blei-Akkus.....	116
	5.5 Das Ladeverfahren des LiPo-Akkus .....	119
	5.6 Das Entladeverfahren eines Akkumoduls .....	122
	6.1 Die Wasserstoffproduktion der reversiblen Brennstoffzelle .....	124
	6.2 Die Kennlinie des Elektrolyseurs .....	126
	6.3 Der Wasserstoffverbrauch einer Brennstoffzelle .....	128
	6.4 Die Kennlinie der Brennstoffzelle .....	130
	6.5 Der Wirkungsgrad der Brennstoffzelle .....	133
	7.1 Betrieb des Elektroautos mit verschiedenen Akkumodulen.....	135
	7.2 Betrieb des Elektroautos mit einer Brennstoffzelle .....	138

# 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



Abb. 1.1: Alessandro Volta<sup>1</sup>

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



Abb. 1.2: Luigi Galvani<sup>2</sup>

untersuchte ihn durch systematische Variation der experimentellen Bedingungen und fand später heraus, dass der Froschschenkelnerf auch ohne Hilfe seiner Elektrisiermaschine ausschlug, sobald er ihn gleichzeitig mit zwei verschiedenen, miteinander verbundenen Metallnadeln berührte. Mit Hilfe dieses Experiments entdeckte er

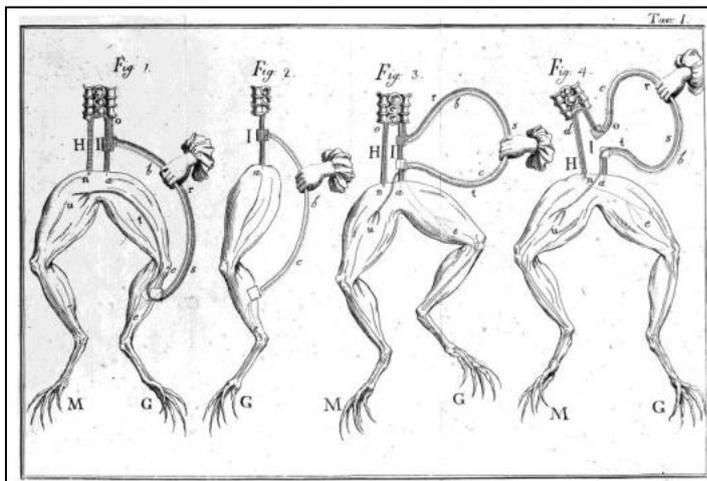


Abb. 1.3: Darstellung der Froschschenkelexperimente, Galvani<sup>3</sup>

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.

<sup>1</sup> <http://www.welt.de>

<sup>2</sup> <http://biografieonline.it>

<sup>3</sup> <http://wellcomeimages.org>

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 Spannungen summiert wurden. So entwickelte er um 1800 die nach ihm benannte „Volta'sche Säule“ (siehe Abb.1.4). Die erste Batterie, wie wir sie heute verstehen war also eine rein chemische bzw. elektrochemische Stromquelle.

Die Volta'sche 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). Durch die Vielzahl an zusammengeschalteten Elementen identischer Bauart ist der Begriff Batterie entstanden. Er bezeichnete 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 durch Kombination von zwei verschiedenen Elektroden und einem Elektrolyt eine Umwandlung chemischer in elektrischer Energie stattfindet. Dabei wird unterschieden zwischen drei verschiedenen Typen: Primärzelle, Sekundärzelle und Brennstoffzelle, auf die in den folgenden Kapiteln eingegangen wird.

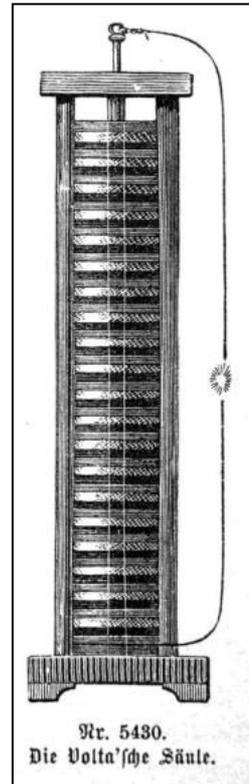


Abb.1.4: Volta'sche Säule<sup>4</sup>

<sup>4</sup> [www.enzyklopaedie.ch](http://www.enzyklopaedie.ch)

## 2. Grundlagen zur Speichertechnologie

Die verschiedenen Energiespeicher werden je nach den vollzogenen Umwandlungsschritten in direkte und indirekte Speicher unterteilt.

Kondensatoren und Spulen werden als direkte Speicher bezeichnet und können elektrische Energie direkt ohne Umwandlungsschritte 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 werden den thermischen Speicherarten zugeordnet. Die bedeutendsten chemischen Speicher sind Batterien und Brennstoffzellen.

### Schwungradspeicher

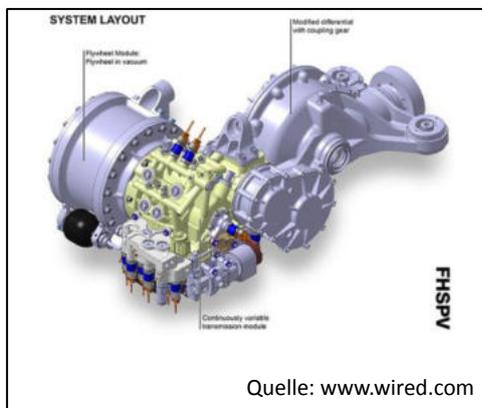


Abb.2.1: Schwungradspeicher<sup>5</sup>

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 weisen Drehgeschwindigkeiten von bis zu 50.000U/min auf. 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.

### Pumpspeicherkraftwerke

Pumpspeicherkraftwerke speichern Strom, indem bei Stromüberschuss Wasser in den höher gelegenen Speichersee gepumpt wird, und später bei Bedarf das



Abb.2.2: Pumpspeicherkraftwerk<sup>6</sup>

<sup>5</sup> [www.wired.com](http://www.wired.com)

<sup>6</sup> [energy-mag.com](http://energy-mag.com)

Wasser talwärts durch eine Wasserturbine fließt. Die Wasserturbine treibt einen Generator an, der wiederum elektrischen Strom erzeugt. Der Wirkungsgrad von Pumpspeicherkraftwerken liegt bei ca. 80%.

Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über verschiedene Kenngrößen der genannten Speichertechnologien.

Speichertechnologie	typ. Ladezeit	typ. Entladezeit	Energiedichte in Wh/kg	Wirkungsgrad	Lebensdauer
Super-Caps	< 100 s	< 100 s	5	>90 %	500000**
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	16500*	50%	>5000 h

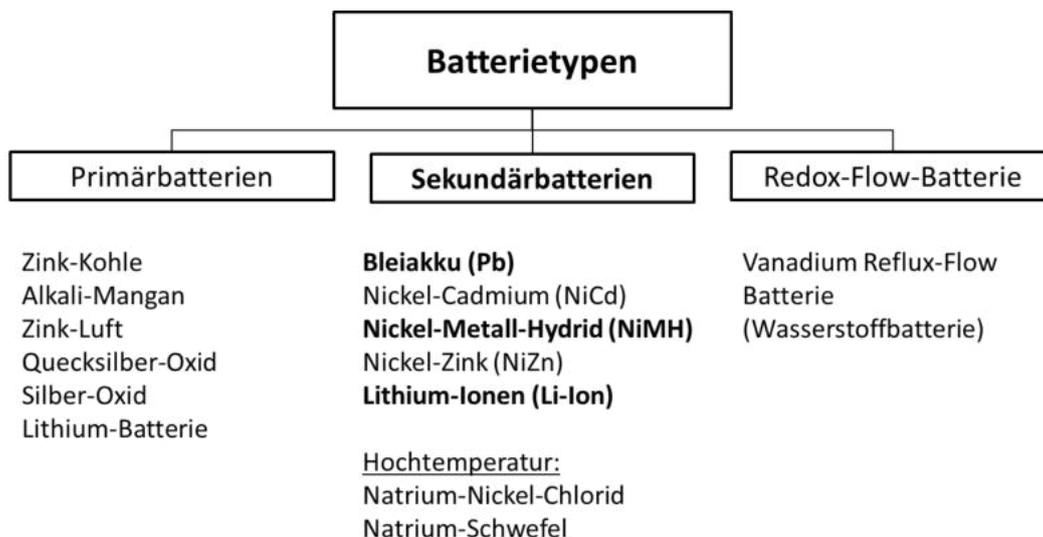
Tab.2.1:Übersicht über elektrische Energiespeichertechnologien

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

\*\* Ladezyklen

## 2.1. Primärbatterien und Sekundärbatterien

Generell werden Batterien in die Bereiche Primärbatterien und Sekundärbatterien unterteilt. Der Begriff Primärbatterien bezeichnet dabei die sogenannten Einwegbatterien. Unter der Klasse der Sekundärbatterien befinden sich die wieder aufladbaren elektrochemischen Batterien, kurz Akkus. Die wichtigsten Vertreter Ihrer Klasse finden Sie in der nachfolgenden Grafik:



### Primärbatterien

Die Primärzelle bzw. Einwegzelle findet sich in unzähligen technischen Produkten wieder, wie zum Beispiel in Kinderspielzeugen, Herzschrittmachern, Fernbedienungen, Radios und Taschenlampen. Auch in der Raumfahrt und beim Militär werden die jeweiligen speziellen

Primärbatterien genutzt, wo sie extremeren Einflüssen widerstehen müssen und können. Dort zeichnen sie sich durch lange und wartungsfreie Lagerfähigkeit (teilweise bis zu 25

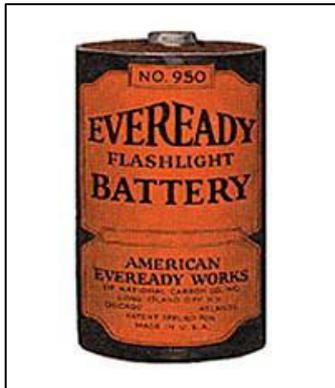


Abb.2.3: Zink-Kohle Batterie, „Eveready-Batterie“ (1890)<sup>7</sup>

Jahre), eine sehr hohe Zuverlässigkeit (99,9%) und Beständigkeit gegenüber großen Temperaturunterschieden (zwischen -50 bis +75°C) aus. Ein entscheidender Unterschied zur Sekundärzelle (Akku) ist die höhere spezifische Energie- und Strombelastbarkeit der Primärzelle. Primärzellen haben eine Energiedichte bis zu 400Wh/kg, welche selbst von hochwertigen Li-Ionen-Akkus nicht erreicht werden (max. 150Wh/kg).

Die erste Primärzelle, welche als Energiespeicher genutzt wurde, war die Zink-Kohle-Zelle von Leclanchès im 19. Jahrhundert. Diese wurde stets weiterentwickelt und fand ihren Höhepunkt in den 60er Jahren als Alkali-Mangan-Batterie. Durch den technischen Fortschritt konnten die Batterien im Laufe der Zeit immer umweltfreundlicher, sicherer, zuverlässiger und leistungsfähiger produziert werden.

### *Sekundärbatterien*

Schon Anfang des 19.Jh. entdeckten Wissenschaftler, dass elektrochemische Stromquellen teilweise wiederaufgeladen werden konnten. Eine Elektrolyse-Zelle mit Platinanode und Platinkathode in verdünnter Schwefelsäure, in der Wasserstoff und Sauerstoff abgeschieden wurde, konnte nach Beendigung der Elektrolyse für kurze Zeit einen „sekundären“ Strom in umgekehrter Richtung liefern. Aus diesem Prozess stammt auch der Begriff „Sekundärbatterie“.

Anfänglich war das Aufladen einer Zelle nur eine experimentelle Spielerei. Generatoren, die mechanische Energie in Elektrizität umwandelten und Sekundärbatterien aufladen konnten, existierten auf kommerzieller Basis erst ab 1870. Doch schon zehn Jahre zuvor hatte der Franzose Gaston Planté (1834-1889) den Bleiakkumulator entwickelt, die heute am weitesten verbreitete Sekundärbatterie. Im folgenden Abschnitt werden die wichtigsten Akku-Typen ausführlich vorgestellt.

#### **2.1.1. Der Nickel-Metall-Hydrid-Speicher (NiMH)**



Abb.2.4: NiMH-Akku, schematisch<sup>8</sup>

Schon Ende des 19.Jahrhunderts wurden Forschungen vorangetrieben, um elektrochemische Speicher zu entwickeln, welche eine höhere Robustheit und Energiedichte als die damals üblichen Bleibatterien aufweisen sollten. Praktisch

<sup>7</sup> <http://www.buch-der-synergie.de>

<sup>8</sup> <http://www.batterien-welt.de>

realisiert wurden zunächst Nickel-Cadmium und Nickel-Eisen-Batterien. Der Nachteil einer deutlich geringeren Zellspannung von etwa 1,3V gegenüber den Blei-Akkus erwies sich im Folgenden sogar als Vorteil, da in den alkalischen Elektrolyten weniger Alterungsprozesse auftraten und die Lebensdauer der Batterien deutlich erhöht werden konnte. Als Weiterentwicklung der reversiblen Speicherung von Wasserstoff in speziellen Metalllegierungen wurde in den 1960er Jahren das Nickel-Metallhydrid-Batteriesystem entwickelt.

Der Nickel-Metallhydrid-Akkumulator ist ein technisch ausgereifter und sicherer Speichertyp. Er ist weniger umweltschädlich als sein Vorgänger, der Nickel-Cadmium-Akku, welcher in der EU inzwischen als kommerzielles Produkt auf Grund des giftigen Schwermetalls Cadmium verboten wurde. Durch seine Energiedichte von 50- 80Wh/kg übertrifft der Nickel-Metallhydrid-Akku den Nickel-Cadmium-Akkumulator um ca. 40-50%.

### *Aufbau und Wirkungsweise*

Die negative Elektrode des Akkus besteht aus einer wasserstoffspeichernden Nickellegierung, die positive Elektrode im geladenen Zustand aus Nickel(III)Oxyhydrat und im entladenen Zustand aus Nickelhydroxid. Der NiMH-Akkumulator besitzt eine

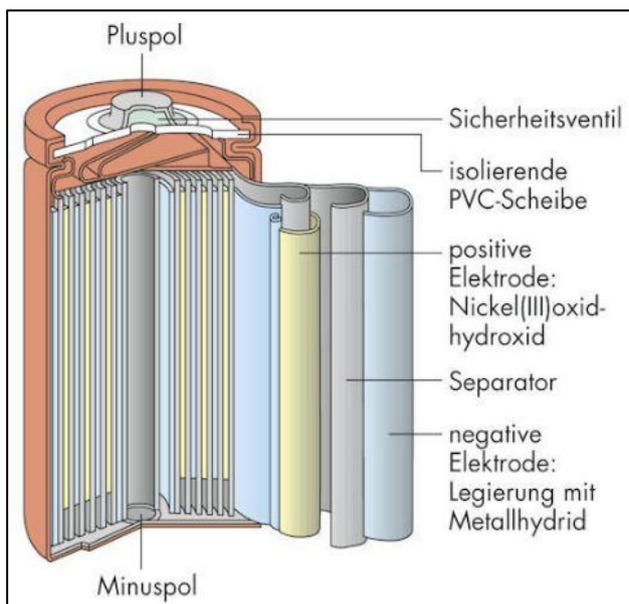


Abb.2.5: Aufbau eines NiMH-Akkus<sup>9</sup>

größere ausgelegt als die positive Elektrode, damit bei Beendigung des Entladevorganges der Wasserstoff oxidiert wird und nicht das Metall.

Zellspannung von maximal 1,35V, die sich durch die elektrochemische Spannungsreihe ergibt. Beim Ladevorgang wird an der positiven Elektrode Wasser gebildet und die negative Elektrode baut dieses wieder ab. An der positiven Elektrode werden negative Hydroxid-Ionen verbraucht und an der negativen Elektrode erzeugt. Konzentrationsänderungen im Elektrolyten finden dabei nicht statt. Die Kapazität des Akkumulators wird durch die Größe der negativen Elektrode bestimmt. Sie ist wesentlich

<sup>9</sup> <http://www.chemiephysikskripte.de>

## Chemische Reaktion

Negative Elektrode	Positive Elektrode
$M(H) + OH^- \begin{matrix} \xrightarrow{\text{Entladen}} \\ \xleftarrow{\text{Laden}} \end{matrix} M + H_2O + e^-$	$NiOOH + H_2O + e^- \begin{matrix} \xrightarrow{\text{Entladen}} \\ \xleftarrow{\text{Laden}} \end{matrix} Ni(OH)_2 + OH^-$

## Eigenschaften und Anwendungen

Die Betriebstemperatur eines NiMH-Akkus liegt zwischen  $-20^\circ\text{C}$  und  $50^\circ\text{C}$ . Die Entladeschlussspannung liegt bei ca. 1V. Unterhalb dieser Spannungen kommt es zur Beschädigung des Akkumulators, was zur Einschränkung der typischen Lebensdauer von 500-1000 Vollladezyklen führt. Die Lebensdauer beträgt im Normalfall ca. 2-5 Jahre. NiMH-Akkumulatoren sind sehr kälteanfällig und bei Temperaturen unterhalb des Nullpunkt ( $-20^\circ\text{C}$ ) werden sie komplett unbrauchbar. Mit der Entwicklung des LSD-NiMH-Akkumulators (Low **S**elf-**D**ischarge) wurde gegen die hohe Selbstentladung angesteuert. Der NiMH-Akkumulator reagiert weniger empfindlich auf Überladung und Tiefenentladung als der Blei- und Lithium-Ionen-Akkumulator. Seine Haupteinsatzorte sind Taschenlampen, Modellbau-Fernsteuerungen, Camcorder und Digitalkameras.

### 2.1.2. Der Nickel-Zink-Akku (NiZn)



Abb.2.6: Bauformen verschiedener NiZn-Akkus<sup>10</sup>

Ebenfalls zur Reihe der Nickel-Batterien gehören die sogenannten Nickel-Zink-Akkus. Obgleich dieser Akku-Typ schon im Jahre 1901 von Thomas Alva Edison patentiert wurde, werden die Akkus erst seit den 2000er Jahren tatsächlich in Serienreife produziert. Die ungenügende Stabilisierung der Zink-Elektrode verhinderte bis dato die praktische Anwendung der Zellen.

## Chemische Reaktion

Negative Elektrode	Positive Elektrode
$Zn + 2OH^- \begin{matrix} \xrightarrow{\text{Entladen}} \\ \xleftarrow{\text{Laden}} \end{matrix} Zn(OH)_2 + 2e^-$	$2NiOOH + 2H_2O + 2e^- \begin{matrix} \xrightarrow{\text{Entladen}} \\ \xleftarrow{\text{Laden}} \end{matrix} 2Ni(OH)_2 + 2OH^-$

<sup>10</sup> [wikimedia.org](http://wikimedia.org)

## Eigenschaften

Die Leerlaufspannung von NiZn-Akkus beträgt bei Vollladung maximal 1,8V. Die Ladeschlussspannung liegt bei etwa 1,9V und die Entladeschlussspannung bei ca. 1,3V. Die höhere Spannung von NiZn-Akkus gegenüber anderen Nickel-Systemen beruht vor allem auf dem größeren Potenzialunterschied zwischen positiver und negativer Elektrode. Die Lage des Potentials der negativen Elektrode liegt jedoch im Bereich der Wasserstoffabscheidung, sodass Zink-Elektroden zu einer starken Selbstentladung neigen. Problematisch ist außerdem die hohe Löslichkeit des Zinkhydroxids, was die Ausbildung von Dendriten (strauchartige Kristallstrukturen im Inneren der Zelle) begünstigt. Die spezifische Energie von NiZn-Akkus liegt im Bereich zwischen 65 und 120Wh/kg.

Trotz der technischen Schwierigkeiten bei der Produktion und im Umgang mit Nickel-Zink-Akkus finden diese in der Praxis Gebrauch, zum Beispiel in Hochleistungs- oder militärischen Anwendungen.

### 2.1.3. Der Blei-Akku (Pb)

Plantes „Urbatterie“ bestand lediglich aus zwei zusammengerollten Bleiblechen mit isolierten Abstandshaltern, welche in eine Elektrolytlösung mit 10%iger Schwefelsäure getaucht wurden. 1873 wurden solche Batterien erstmals mit Hilfe eines von Hand angetriebenen Gleichstromgenerators aufgeladen, wobei der Generator beim Entladen als Motor funktionierte. Auf diese Weise gelang es erstmals zu zeigen, dass mechanische Energie elektrochemisch gespeichert werden kann.

## Aufbau und Wirkungsweise

Der Blei-Akku wird in drei verschiedenen Bauarten produziert. Der Blei-Vlies-Akkumulator besitzt die Eigenschaft der wartungsfreien und geschlossenen Akkumulatoren. Der Elektrolyt

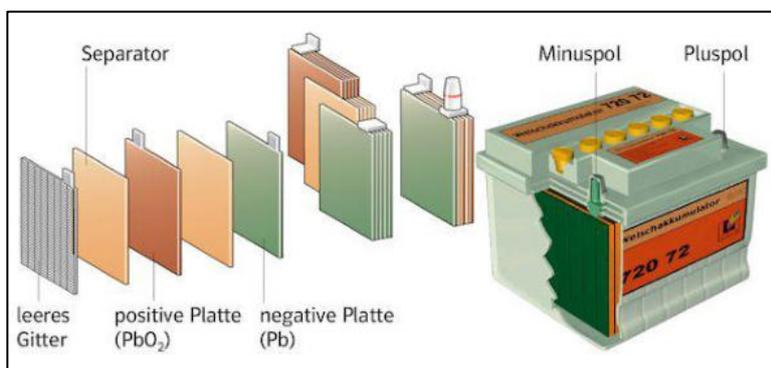


Abb.2.7: Schematischer Aufbau eines Blei-Akkus<sup>11</sup>

befindet sich in einem Glasfaser-Vlies zwischen den Bleiplatten. Der Blei-Gel-Akkumulator gehört ebenfalls zu den wartungsfreien, geschlossenen Akkumulatoren und zeichnet sich durch seine gebundene Schwefelsäure aus. Dies wird durch die

Zugabe von Kieselsäure realisiert. Beim klassischen Blei-Akkumulator, der zu den offenen Typen zählt, besteht der Elektrolyt aus 36,9%iger Schwefelsäure ( $H_2SO_4$ ). Seine Zelle

<sup>11</sup> <http://www.chemiephysikskripte.de>

besteht aus zwei entgegen gesetzt gepolten Bleiplattengruppen, die in ein Elektrolyt getaucht sind. Beide Elektroden bestehen aus Blei in metallischer bzw. in oxidierte Form. Beim Entladen des Akkumulators entsteht an beiden Elektroden das Endprodukt Bleisulfat ( $PbSO_4$ ), das sich entweder am Boden der Zelle oder auf den Elektroden absetzt. Beim Laden entsteht eine Rückreaktion zu metallischem Blei bzw. Bleioxid ( $PbO_2$ ).

### Chemische Reaktion

<i>Negative Elektrode</i>	<i>Positive Elektrode</i>
$Pb + H_2SO_4 \begin{matrix} \xrightarrow{\text{Entladen}} \\ \xleftarrow{\text{Laden}} \end{matrix} PbSO_4 + 2H^+ + 2e^-$	$PbO_2 + H_2SO_4 + 2H^+ + 2e^- \begin{matrix} \xrightarrow{\text{Entladen}} \\ \xleftarrow{\text{Laden}} \end{matrix} PbSO_4 + 2H_2O$

### Eigenschaften und Anwendung

Die Lagertemperatur eines Blei-Akkus liegt zwischen  $-25^\circ$  bis  $+60^\circ$ . Die Betriebstemperatur liegt zwischen  $-10^\circ$  bis  $+60^\circ$ . Der Blei-Akkumulator sollte nicht überladen werden, da dies zur sogenannten *Gasung* führen kann. Wenn sich das Bleisulfat auflöst, entsteht an der Kathode Wasserstoffgas und an der Anode Sauerstoffgas, was zu einer Knallgasproduktion führt. Dieses Phänomen tritt ab einer Zellspannung von 2,3V auf. Die Entladeschlussspannung eines Blei-Akkumulators liegt bei 1,4V-1,7V und ist die unterste Spannungsgrenze bis zu welcher der Akkumulator entladen werden darf. Eine Unterschreitung dieser Spannung (Tiefenentladung) führt zu irreversibler Schädigung und Kapazitätsverlust des Akkumulators. Eine Faustregel besagt, dass der Akkumulator nicht unterhalb von 20% seiner Maximalkapazität entladen werden sollte. Die Kapazität von Blei-Akkus variiert je nach Typ von 1Ah bis 12.000Ah.

Wird der Blei-Akku als Starterbatterie verwendet, werden sechs Bleiplattengruppen in Reihe geschaltet, von denen jede eine maximale Zellspannung von 2,15V bereitstellt. Zwischen den einzelnen Platten befinden sich säurefeste Separatoren, um einen Kurzschluss zu verhindern. Der Blei-Akkumulator besitzt eine Lebensdauer von ca. 400-800 Vollladezyklen, was einer zeitlichen Spanne von etwa 4-6 Jahren entspricht.

Weil das Plattenpaket nur aus Blei und Bleiverbindungen besteht, ist das Recyceln von Blei-Akkus relativ einfach. Durch Reduzieren und Einschmelzen kann das Blei zurückgewonnen und zu neuen Elektroden aufgearbeitet



Abb.2.8: Bleiakku-Starterbatterie<sup>12</sup>

werden. Der Blei-Akkumulator ist ein langlebiger und ausgereifter Speichertyp. Er hat sich nicht nur in der Automobilbranche als Starterbatterie durch seine kurzfristige hohe

<sup>12</sup> <http://www.tipps.net>

Stromlieferung und Kälteresistenz bewährt, sondern auch in der USV- und Notstromtechnik etabliert. Der Blei-Akkumulator ist ein kostengünstiger Speicher, besitzt einen hohen Wirkungsgrad (70-80%) und besitzt eine hohe Recyclingquote. Die Nachteile sind seine geringe Energiedichte (25 bis 40Wh/kg), relativ kurze Lebensdauer, lange Ladezeit, seine Unbrauchbarkeit nach Tiefentladung und die Verformung der Bleielektroden bei einem Kurzschluss.

#### 2.1.4. Die Lithium-Ionen-Technologie (Li-Ion)

Durch die rasante Weiterentwicklung von Smartphones, Notebooks und Tablets steigt der Energiebedarf dieser Systeme massiv. Da elektronische Geräte immer kleiner und leistungstärker werden, werden Akkumulatoren benötigt, die in Baugröße, Form und Energiedichte diesen Ansprüchen gerecht werden. Die Lithium-Ionen-Technologie ist in der Lage, diesen Bedürfnissen gerecht zu werden.

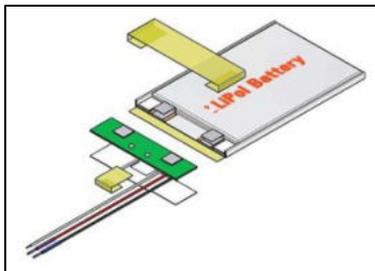


Abb.2.9: Schematischer Aufbau eines Lithium-Polymer-Akkus<sup>13</sup>

Unter dem Begriff Lithium-Batterien werden verschiedene Lithium-Ionen-Akkumulatoren zusammengefasst und anhand unterschiedlicher Materialien (Elektroden, Elektrolyte) in weitere Klassen untergliedert.

Allgemein dient in Lithium-Batterien die negative Elektrode als Quelle für Lithium-Ionen und die positive Elektrode als Senke. Wenn metallisches Lithium als negative Elektrode eingesetzt wird, kann die Zellspannung aus der Differenz der elektrochemischen Potentiale der Elektrodenmaterialien ermittelt werden. Die Lithium-Batterien können daher in Systeme mit metallischem Lithium und in solche ohne dieses unterteilt werden.

Im Folgenden wird je nach Art des Elektrolyten unterschieden zwischen dem klassischen Lithium-Ionen-Akku mit einem flüssigen Elektrolyten und dem Lithium-Polymer-Akku (LiPo), dessen Elektrolyt aus einer Polymermembran besteht. Beim Lithium-Eisenphosphat-Akku (LiFePo) wird Lithium-Eisenphosphat als Kathodenmaterial eingesetzt.

Die Kenndaten von Lithium-Ionen-Akkus variieren bauartbedingt sehr stark (siehe Tabelle 2.2). Daher ist es wichtig, dass bei der Anwendung (Ladeverhalten/Entladeverhalten) immer auf die Angaben der Unterbezeichnung geachtet wird.

Der Lithium-Ionen-Akkumulator besitzt eine hohe Energiedichte von 90-160Wh/kg und einen Wirkungsgrad zwischen 70-90%, weshalb die Lithium-Ionen-Technologie genau für diese Anwendungen geeignet ist. Durch seine geringe Selbstentladung und Zyklfestigkeit ist er einer der wichtigsten Sekundärspeicher der heutigen Zeit. Seine großen Nachteile sind die

<sup>13</sup> <http://www.lipobattery.de>

Kälteempfindlichkeit und die Brand- und Explosionsgefahr bei Überladung oder Tiefenentladung.

	Li-Ionen-Akku	LiPo-Akku	LiFePo-Akku
max. Zellspannung	4,1 V	4,2 V	3,6 V
max. Ladespannung	4,1 V	4,2 V	3,6 V
Nennspannung	3,6 V	3,7 V	3,3 V
Entladeschlussspannung	3,0 V	2,5 V	2 V
max. Ladestrom	1 C	1 C	4 C
max. Entladestrom	>30 C	>30 C	> 30 C
max. Ladetemperatur	45°C	45°C	60°C
min. Ladetemperatur	0°C	0°C	-30°C

Tab.2.2: Klassische Kenndaten der drei wichtigsten Li-Ionen-Technologien

### Aufbau und Wirkungsweise

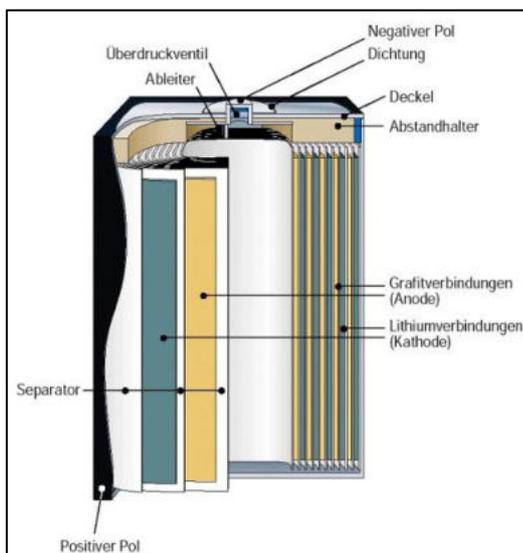


Abb.2.10: Schematischer Aufbau eines Lithium-Ionen-Akkus<sup>14</sup>

Die positive Elektrode eines Lithium-Ionen-Akkus besteht aus einer Lithium-Metalloxyd-Elektrode (meist Kobalt), die negative Elektrode aus Grafit. Da Lithium stark mit Wasser reagiert, enthält der Elektrolyt kein Wasser, sondern besteht aus Lösungsmittel (Ethylencarbonat/Propylencarbonat), in dem Leitsalze gelöst sind. Der Separator trennt die Elektroden und verhindert dadurch das Auftreten von Kurzschlüssen. Beim Ladevorgang wandert ein Teil der Lithium-Ionen aus dem Metalloxyd durch den Separator zur negativen Grafit-Elektrode und wird dort wieder eingelagert, um Elektronen für den Ladestrom abzugeben. Beim

Entladen bewegen sich die Lithium-Ionen in die entgegengesetzte Richtung und werden wieder im Metalloxyd eingelagert, um dort Elektronen für den Entladestrom abzugeben.

### Chemische Reaktion (Lithium-Ionen-Akku)

Negative Elektrode	Positive Elektrode
$Li_2Graphit \xrightleftharpoons[\text{Laden}]{\text{Entladen}} Graphit + 2Li^+ + 2e^-$	$MnO_2 + 2Li^+ + 2e^- \xrightleftharpoons[\text{Laden}]{\text{Entladen}} Li_2MnO_2$

<sup>14</sup> <http://images.tecchannel.de>

## Eigenschaften und Anwendung

Lithium-Ionen-Akkumulatoren sind stark in ihrem Temperaturbereich eingeschränkt. Hierbei ist es wichtig, die drei unterschiedlichen Betriebsarten Lagerung, Entladen und Laden zu betrachten. Die typischen Lagertemperaturen liegen bei  $-20^{\circ}\text{C}$  bis  $+45^{\circ}\text{C}$ . Der Entladetemperaturbereich liegt bei  $-10^{\circ}\text{C}$  bis  $+60^{\circ}\text{C}$ , und der Ladetemperaturbereich zwischen  $0^{\circ}\text{C}$  bis  $+45^{\circ}\text{C}$ . Die Ladeschlussspannung liegt bei  $4,1\text{ V}$  (bzw.  $4,2\text{V}$  beim LiPo-Akku). Die unterste Spannungsgrenze liegt bei  $2,5\text{ V}$  (bzw.  $3,0\text{V}$  beim LiPo-Akku). Größere oder kleinere Spannungen führen zu Beschädigungen des Akkumulators. Wird die untere Spannung unterschritten, kann dies zu irreversiblen Schäden führen. Die Ausmaße werden meist beim Ladeprozess wirksam. Sie können einen thermischen Kurzschluss verursachen und einen Brand bzw. eine Explosion des Akkus herbeiführen. Daher ist es wichtig, speziell den Ladeprozess zu überwachen und die maximale Ladespannung sowie den maximalen Ladestrom nicht zu überschreiten. Moderne Lithium-Ionen-Einzelzellen besitzen ein vielfältiges Sicherheitskonzept. Neben der ständigen



Abb.2.11: Folgen eines Lithium-Akku-Brandes<sup>15</sup>

Weiterentwicklung der Grundmaterialien und Separatoren sind in der Regel zusätzlich passive (PTC-Sicherungen) als auch aktive Sicherheitsbaugruppen (Überwachungselektronik) in jeder Einzelzelle integriert. Da Lithium-Ionen-Akkumulatoren sehr temperatursensibel sind, ist es wichtig, die Temperatur im Lade- und Entladebetrieb zu überwachen. Hierfür wird meist ein einfacher NTC-Temperaturwiderstand eingesetzt. In untenstehender Abbildung (Abb.2.12) ist die integrierte Überwachungsschaltung inkl. NTC-Temperaturwiderstands des in der EMobility-Serie eingesetzten Li-Po-Moduls abgebildet. Die Überwachungsschaltung beeinflusst natürlich den Gesamtinnenwiderstand der Zelle. Der Widerstand der Schaltung wird mit ca.  $60\text{m}\Omega$ , der daraus resultierende interne Stromverbrauch mit  $3\text{-}6\mu\text{A}$  angegeben.

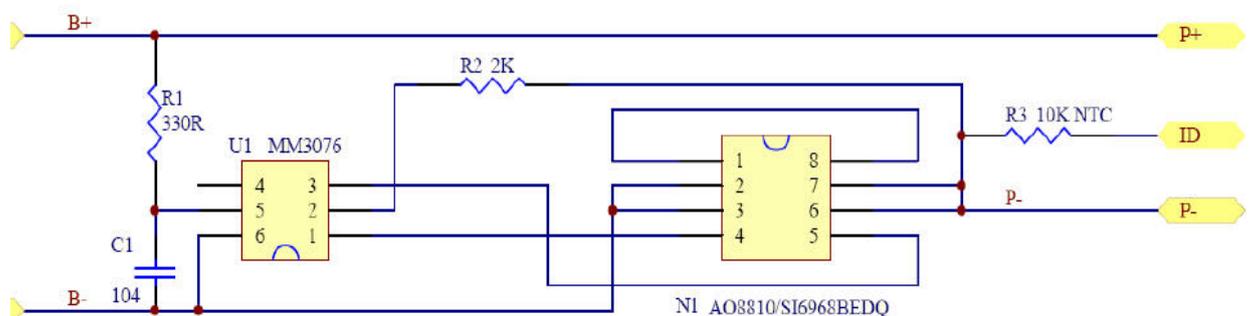


Abb.2.12: Überwachungsschaltung mit NTC-Widerstand

<sup>15</sup> <http://www.batteryuniversity.com>

Die Überwachungsschaltung reagiert auf folgende Parameter mit Abschaltung:

- Überladeschutz:  $4,275 \text{ V} \pm 0,02 \text{ V}$
- Tiefentladeschutz:  $3,0 \text{ V} \pm 0,03 \text{ V}$
- Überstromschutz:  $2,0 \text{ A} - 5,0 \text{ A}$
- Kurzschluss

Die Informationen des NTC-Widerstandes zur Betriebstemperaturbestimmung werden in der Regel von der nachfolgenden Anwendung weiterverarbeitet. Da jeder Hersteller für jede Einzelzelle individuelle Betriebsbestimmungen definiert, folgt jedem Li-Ionen-Akku ein übergeordnetes Batterie-Management-System (BMS) welches zusätzlich den Lade- und Entladebetrieb überwacht.

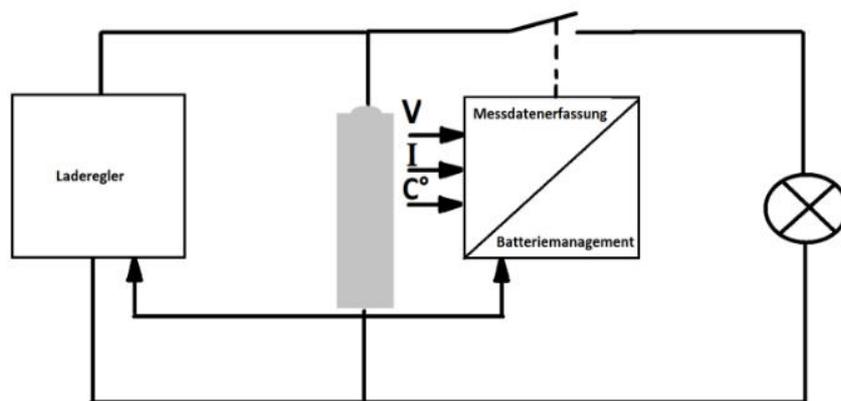


Abb.2.13: Batteriemanagementsystem

Die Anwendung von Lithium-Polymer-Akkus im Speziellen liegt vor allem im Bereich Elektromobilität, Mobiltelefonie und in elektrischen Kleingeräten. Auch in ortsfesten Kraftwerken werden die Lithium-Polymer-Akkus teilweise als Energiespeicher eingesetzt.

## 2.2. Kondensatoren

Zur Energiespeicherung im Bereich der elektrischen Energiespeicher werden heutzutage sogenannte Superkondensatoren (Supercaps) eingesetzt. Diese zeichnen sich durch sehr hohe Kapazitäten, eine hohe Dynamik und eine hohe Gesamt-Zyklenzahl aus.

### *Aufbau und Wirkungsweise*

Das Wirkungsprinzip von Kondensatoren beruht auf einem elektrischen Feld zwischen den Kondensatorplatten, in dem Energie gespeichert wird. Die sogenannten Supercaps sind dabei Weiterentwicklungen von Doppelschichtkondensatoren. Bei diesen wird genau wie in herkömmlichen Kondensatoren die Speicherung elektrischer Energie durch Ladungstrennung zwischen zwei Elektroden im elektrischen Feld realisiert. Der wesentliche Unterschied besteht jedoch in der Art des Dielektrikums und im Aufbau der einzelnen Schichten. Der klassische Kondensator ist aufgebaut aus einem Drei-Schichtsystem: *Elektrode-Dielektrikum-Elektrode*. Der Supercap besteht aus einem komplexeren Aufbau:

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



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://www.wikimedia.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

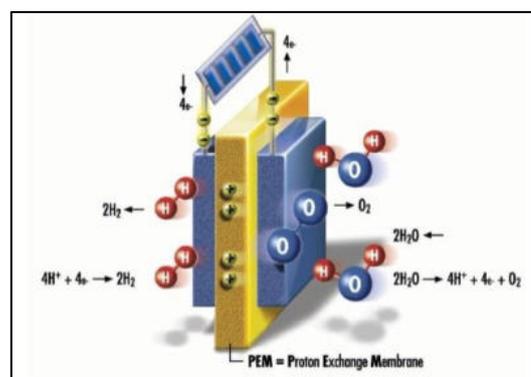


Abb.2.16: Schematischer Aufbau eines PEM-Elektrolyseurs<sup>18</sup>

Elektroden mit einer Edelmetallbeschichtung, die durch eine protonendurchlässige Polymermembran (PEM-Proton Exchange Membrane) voneinander getrennt sind.

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

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

Dem PEM-Elektrolyseur wird bei der herkömmlichen Bauweise auf der Anodenseite Wasser zugeführt und zwischen den Elektroden wird eine elektrische Spannung angelegt. Durch die katalytische Wirkung des Edelmetalls zersetzt sich das Wasser in Sauerstoff, freie Elektronen und Wasserstoff-Ionen. Die Ionen wandern durch die Polymermembran auf die Kathodenseite und rekombinieren dort mit den Elektronen zu Wasserstoff.

Bei der alkalischen Elektrolyse dient Kalilauge als Elektrolyt. Die Elektroden sind in diesem Fall durch eine ionendurchlässige, gasdichte Membran, das sogenannte Diaphragma voneinander getrennt. Alkalische Elektrolyseure werden vor allem im großindustriellen Maßstab eingesetzt.

Hochtemperaturelektrolyseure arbeiten bei Betriebstemperaturen von über 900°C. Vorteil ist die Einspeisung eines Teils der Reaktionsenthalpie als Wärme, wodurch die angelegte Spannung deutlich reduziert und der Wirkungsgrad gegenüber der alkalischen Elektrolyse verbessert werden kann.

Neben den kommerziellen Verfahren zur Wasserstofferzeugung kann Wasserstoff auch aus der Pyrolyse und Vergasung von Biomasse erzeugt werden. Das Kværner-Verfahren oder die Produktion von Wasserstoff aus Grünalgen sind Technologien, die sich derzeit noch in der Erprobungsphase befinden.

Bei der Speicherung von Wasserstoff müssen einige Schwierigkeiten beachtet werden, die sich aus den chemischen und physikalischen Eigenschaften von Wasserstoff ergeben. Durch die geringe molare Masse des Elements Wasserstoff besitzt das Gas eine niedrige volumenbezogene Energiedichte und muss daher stark komprimiert werden. Ebenfalls bedingt durch die geringe Molekülgröße diffundiert Wasserstoff relativ einfach durch die Tankwände, weshalb hohe Anforderungen an die Speichermaterialien gestellt werden müssen. Bei der Verflüssigung von Wasserstoff durch das Herabsenken der Temperatur entsteht trotz Isolation ein Wärmefluss von außen in den Tankbehälter hinein. Dies zieht Isolationsverluste durch Ausgasung nach sich, die zu einem Verlust von Wasserstoff führen können, wenn dieser nicht sofort genutzt werden kann. Zur Speicherung von Wasserstoff werden je nach Anwendungsgebiet üblicherweise die folgenden Verfahren genutzt:

#### *Speicherung in Druckgasflaschen*

Vorteil bei der Speicherung in Druckgasflaschen ist der relativ niedrige Preis. Allerdings stehen die Tanks unter einem hohen Druck und nehmen ein großes Volumen ein. Anwendungsfelder sind daher stationäre Anlagen oder Busse, wo das große Raumvolumen kein Problem darstellt. Eine Möglichkeit der Speicherung sehr großer Mengen von Wasserstoff unter niedrigem Druck sind unterirdische Salz- und Felskavernen.

## Speicherung in Flüssiggasspeichern

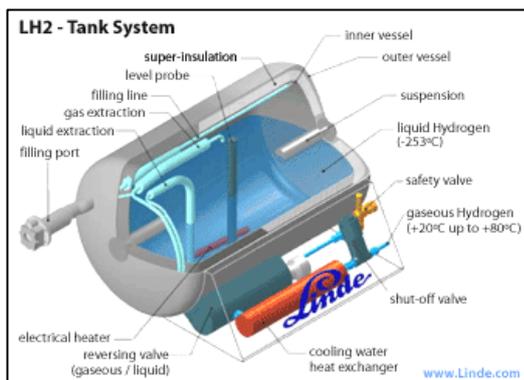


Abb.2.18: Schematischer Aufbau eines H<sub>2</sub>-Flüssiggasspeichers<sup>19</sup>

Zur Speicherung in Flüssiggasspeichern wird der Wasserstoff durch Herabkühlen auf etwa -250°C verflüssigt und kann unter einem geringen Raumvolumen gelagert werden. Nachteilig sind bei diesem Verfahren vor allem der hohe Preis und der große Energieaufwand beim Verflüssigen, der etwa ein Drittel der enthaltenen Gesamtenergie beträgt. Anwendung finden die Flüssiggastanks vor allem

im PKW und bei Raumfahrtprogrammen.

## Speicherung in Metallhydridspeichern

Aus den Erfordernissen der Automobilindustrie wurde die Methode entwickelt, Wasserstoffatome in festen Metallkörpern einzulagern. Durch dieses Verfahren werden die Vorteile der Flüssiggas- und Druckgasspeicher miteinander vereint: die Speicherung von Wasserstoff unter geringem Volumen und geringem Ladedruck. Nachteilig in der Anwendung wirken sich allerdings das große Gewicht der Metallhydridspeicher und der hohe Preis aus.

### 2.3.2. Aufbau und Wirkungsweise

In der Anwendung existieren verschiedene Arten von Brennstoffzellen, die unterschieden werden können anhand von Parametern wie Betriebstemperatur oder verwendeter Brennstoff. So arbeiten zum Beispiel die Schmelzkarbonat- und die Festoxid-Brennstoffzelle bei sehr hohen Betriebstemperaturen von bis zu 1000°C. Vorteil bei den Hochtemperatur-Brennstoffzellen ist die Möglichkeit eines zellinternen Reformierungsprozesses, sodass diese nicht auf Wasserstoff als Brennstoff angewiesen sind. Neben den herkömmlichen Brennstoffzellen-Systemen wurden in den letzten Jahren Methanol- und Ethanol-Brennstoffzellen entwickelt. Diese nutzen einen flüssigen Energieträger, bei dem sich große Vorteile in Bezug auf Handhabung und vorhandener Infrastruktur ergeben.

Die hier vorgestellte Polymermembran-Brennstoffzelle (PEM-BZ) ist eine Niedrigtemperatur-Zelle, welche mit Wasserstoff als Brennstoff arbeitet. Die PEM-Brennstoffzelle (oftmals auch Proton Exchange Membrane) wurde in den 1960er Jahren von der Firma General Electric für die Nasa entwickelt und besaß anfangs eine Lebensdauer von etwa 500 Betriebsstunden. Ihre Elektrolytmembran bestand aus Aryalken- und Fluorkohlenstoff-Polymeren. Die Firma DuPont entwickelte kurz darauf eine Elektrolytmembran, die aus Nafion bestand, wodurch die Betriebsstundenanzahl wesentlich erhöht wurde. Lange Zeit ruhte die Entwicklung der

<sup>19</sup> <http://www.emc-eu.de>

PEM-Brennstoffzelle, bis ab 1985 die Membrantechnik, der Zellaufbau und die Platinreduzierung des Katalysators weiter-entwickelt wurde.

Die PEM-Brennstoffzelle besteht aus zwei Elektroden, die mit einem Edelmetall, meist Platin beschichtet sind. Eine protonendurchlässige Polymermembran trennt beide Elektroden,

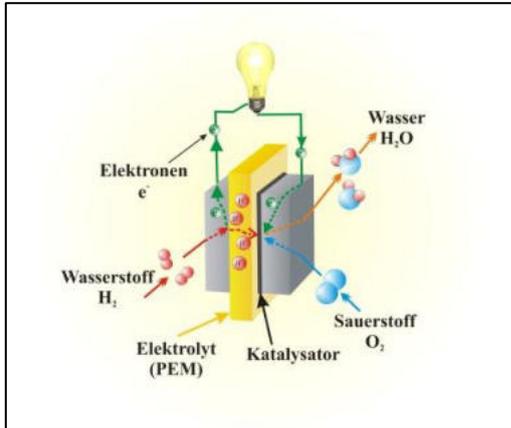


Abb.2.19: Schematischer Aufbau einer PEM-Brennstoffzelle<sup>20</sup>

sodass die Prozesse der Oxidation und Reduktion räumlich getrennt voneinander stattfinden.

Daher spricht man bei den Vorgängen in einer Brennstoffzelle auch von einer „kontrollierten Knallgasexplosion“ oder „kalter Verbrennung“.

Durch die katalytische Wirkung der Edelmetalle findet an der Anode ein Oxidationsprozess statt, bei dem Wasserstoff aufgespalten wird in Wasserstoff-Ionen und Elektronen. Die

Wasserstoff-Ionen wandern durch die protonendurchlässige Membran auf die

Kathodenseite und rekombinieren dort unter Zufuhr von Sauerstoff mit den Elektronen zu Wasser. Die für den Reduktionsprozess nötigen Elektronen fließen durch einen äußeren Stromkreis auf die Kathodenseite und verrichten auf diese Weise elektrische Arbeit, die von einem Verbraucher genutzt werden kann. Die Potentialdifferenz zwischen den Elektroden wird als Elektrodenpotenzial bezeichnet. Sie ergibt sich aus der elektrochemischen Spannungsreihe und beträgt in einer PEM-Brennstoffzelle 1,23V. In der Praxis wird diese theoretische Zellspannung allerdings nicht erreicht und liegt meist zwischen 0,6 und 0,9V. Vor allem Spannungsverluste durch den Innenwiderstand, Reaktionshemmungen oder ungenügende Gasdiffusion sorgen für die Herabsenkung gegenüber dem theoretischen Wert.

### Chemische Reaktion

Anodenreaktion	Kathodenreaktion
$2H_2 \rightarrow 4H^+ + 4e^-$	$O_2 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2O$

### 2.3.3. Eigenschaften und Anwendung

Brennstoffzellen können bezogen auf die real erreichbare Spannung Wirkungsgrade zwischen 70% und annähernd 100% erreichen. Berücksichtigt man die in der Praxis nicht volle erreichbare theoretische Zellspannung von 1,23V, dann liegt der Wirkungsgrad eher im Bereich von 40-70%. Die Betriebstemperatur von Niedrigtemperatur-PEM-Brennstoffzellen

<sup>20</sup> <https://www.helmholtz-berlin.de>

liegt zwischen 20 und 80°C. Vorteile von PEM-Brennstoffzellen liegen in ihrem guten Kaltstartverhalten, dem hohen Wirkungsgrad und der relativ einfachen Handhabung bei der Zusammenschaltung mehrerer Brennstoffzellen zu einem Stack, um hohe Leistungen zu erreichen. Nachteilig wirken sich der hohe Preis des Katalysatormaterials (Platin) und die relativ hohen Ansprüche an die Reinheit des Wasserstoffs aus.

Die Anwendungsbereiche von Brennstoffzellen werden unterteilt in portable, stationäre und mobile Anwendungen. Zu den portablen Anwendungen zählen vor allem Ladegeräte für



Abb.2.20: Dezentrale Kraft-Wärme-Kopplungsanlage<sup>21</sup>

elektronische Kleingeräte und Systeme im Bereich Caravaning, Camping und Yachting. Bei den stationären Anwendungen spielen vor allem dezentrale Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen oder kleinere Systeme im Bereich der Hausenergieversorgung eine Rolle. Die mobilen Anwendungen liegen im Bereich Kraftfahrzeuge und in Nischenanwendungen der Schifffahrt sowie des Luftverkehrs.

## 2.4. Vor- und Nachteile verschiedener Speichertechnologien

In der folgenden Tabelle werden die wichtigsten Vor- und Nachteile der im Experimentiersystem enthaltenen Speichertechnologien dargestellt.

	Vorteile	Nachteile
Blei-Säure-Batterien	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ etablierte Batterietechnologie, dadurch lange Erfahrung</li> <li>+ kostengünstig, vor allem bei Inselnetzen</li> <li>+ ausreichende Energie- und Leistungsdichte für stationäre Anwendungen</li> <li>+ hohe Sicherheit</li> <li>+ kein komplexes Zellmanagement nötig</li> <li>+ unabhängig von Standortbedingungen, viele Hersteller weltweit</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- unsymmetrische Lade- und Entladezeit</li> <li>- Tiefentladung bei diesem Akkutyp besonders schädlich</li> <li>- Temperaturmanagement wichtig</li> <li>- Batterieraumlüftung erforderlich</li> <li>- begrenzte Zyklenlebensdauer</li> <li>- Konkurrenz durch Kostensenkung von Lithium-Batterien</li> <li>- begrenzte Bleilagerstätten</li> </ul>

<sup>21</sup> MTU Onsite Energy

Nickel-Batterien	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ hohe Lebensdauer</li> <li>+ hohe Energiedichte</li> <li>+ Einsatz im Hochleistungsbereich</li> <li>+ Anwendung in Hybridfahrzeugen möglich</li> <li>+ Einsatz bei tiefen Temperaturen und extremen Umgebungsbedingungen möglich</li> <li>+ nicht so sensibel gegenüber Tiefentladung und unterschiedlichen Ladezuständen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Nickel relativ teuer</li> <li>- Konkurrenz durch Kostensenkung von Lithium-Batterien</li> </ul>
Lithium-Batterien	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ höchste Energiedichte, Wirkungsgrade und Leistungsfähigkeit</li> <li>+ große Stückzahlen führen zu Kostensenkung</li> <li>+ keine speziellen Anforderungen an Standorte</li> <li>+ Entwicklung neuer Aktiv-Materialien</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sicherheit</li> <li>- Aufwendiges Batteriemanagementsystem erforderlich</li> <li>- Herstellung und Kühlung aufwendig</li> <li>- Schnellladefähigkeit</li> <li>- Lebensdauer begrenzt bei Ladezuständen außerhalb von 30-70%</li> <li>- hohe Kosten</li> <li>- begrenzte Lithium-Vorkommen</li> </ul>
Kondensatoren	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ sehr hoher Wirkungsgrad</li> <li>+ hohe Leistungsfähigkeit</li> <li>+ lange Zyklenlebensdauer</li> <li>+ Einsatz in Anwendungen mit hohen Ansprüchen an Reaktionszeiten möglich</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- geringe Energiedichte</li> <li>- hohe Kosten (pro Energie)</li> <li>- Konkurrenz durch Batterien im Hochleistungsbereich</li> </ul>
Wasserstoffspeicherung	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ Möglichkeiten der Langzeitspeicherung</li> <li>+ geringer Flächenverbrauch</li> <li>+ große Energiemengen speicherbar</li> <li>+ hohe Energiedichte (massenbezogen)</li> <li>+ Wasser unbegrenzt verfügbar</li> <li>+ Wasserstoff in allen Energiesektoren nutzbar</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- hohe Kosten</li> <li>- geringer Wirkungsgrad</li> <li>- keine Wasserstoffturbinen verfügbar</li> <li>- Konkurrenz in Nutzung geeigneter Kavernen zu Druckluft-, Erdöl, Erdgas-Lagerung</li> <li>- kaum Einspeisung ins Erdgasnetz</li> <li>- Kaum vorhandene Wasserstoffinfrastruktur (Transport, Verteilung, Anwendung)</li> </ul>

Tab.2.3: Übersicht über Vor- und Nachteile verschiedener Speichertechnologien

### 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).

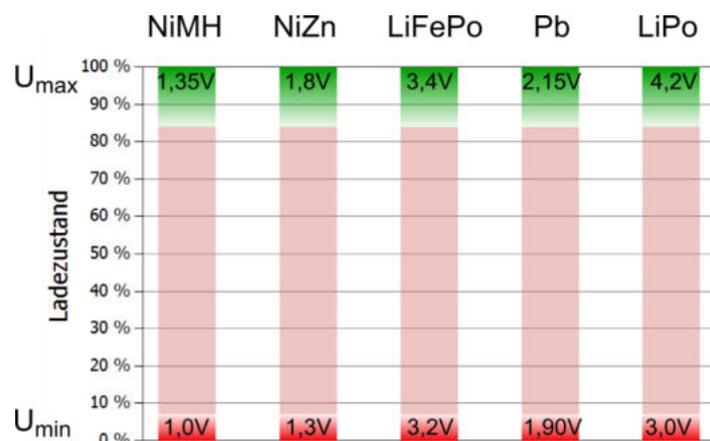


Abb.3.1: Der Ladezustand von Akkumodulen

#### 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

Alterung und Betriebsfehler (Überschreitung der Grenzwerte) steigt der Innenwiderstand irreversibel mit der Zeit an. In der Industrie werden je nach Batterietyp und Batteriegröße die Innenwiderstandswerte festgelegt, nach denen der Akku als defekt (EOL – End of life) bezeichnet wird und ausgetauscht werden muss. Für Lithium-Ionen Akkus kann zum Beispiel im Falle  $R_i > 150 \% \cdot R_0$  die Akkuzelle als defekt (EOL) definiert werden.

### Bestimmung des Innenwiderstands

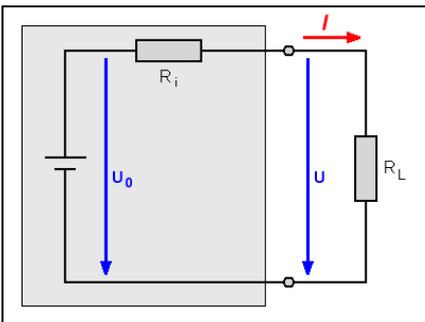


Abb.3.2: Ersatzschaltbild zur Ermittlung des Innenwiderstands<sup>22</sup>

Die Innenwiderstandbestimmung sollte immer bei einem Ladezustand oberhalb von 20% durchgeführt werden. Zur Ermittlung des Innenwiderstands wird eine Reihenschaltung aus dem Akkumodul und einem festgelegten Widerstand  $R_{Last}$  aufgebaut. Anschließend wird zwischen den beiden Betriebsfällen Leerlauf und Belastung unterschieden. Zunächst wird die Leerlaufspannung des Akkumoduls  $U_0$  gemessen. Anschließend wird die Spannung  $U_{Last}$  und der Strom  $I_{Last}$  bei einer Belastung mit dem definierten Widerstand ermittelt. Die Größen stehen dabei in folgendem Zusammenhang:

$$U_{Last} = U_0 - I \cdot R_i$$

Nach Ermittlung aller Größen kann der Innenwiderstand des Akkumoduls durch Umstellen der Formel bestimmt werden:

$$R_i = \frac{U_0 - U_{Last}}{I_{Last}}$$

### 3.3. Die Vierpunktmessung

Alle Spannungsmodule der EMobility-Serie sind mit einer PTC-Sicherung ausgestattet (siehe Abb.3.3). Der Widerstand der PTC-Sicherung kann die Messung von Strom und Spannung des Akkumoduls verfälschen. Um die Innenwiderstandbestimmung der Spannungsmodule dennoch aussagekräftig durchführen zu können, sind für die Spannungsmessungen zusätzliche Messpunkte eingebaut worden.

Bei der Vierpunktmessung fließt über zwei der angelegten Leitungen ein bekannter elektrischer Strom durch den PTC-Widerstand. Die am Widerstand abfallende Spannung wird hochohmig über zwei weitere Leitungen abgegriffen und mit einem Voltmeter gemessen. Der zu bestimmende Widerstand wird anschließend daraus nach dem ohmschen Gesetz berechnet.

<sup>22</sup> <http://www.hobby-bastelecke.de>

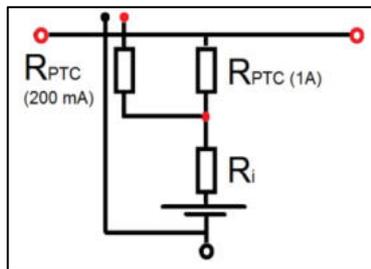


Abb.3.3: Schaltskizze PTC-Sicherung der Spannungsmodule

### 3.4. Die Speicherkapazität und Energiegehalt verschiedener Akku-Module

Unterschiedliche Speichersysteme können anhand verschiedener Parameter unterschieden werden. Auch innerhalb der elektrochemischen Energiespeicher wie Batterien gibt es deutliche Unterschiede was Kenngrößen wie Speicherkapazität, volumetrische, bzw. die massenbezogene Energiedichte oder den Wirkungsgrad anbelangt.

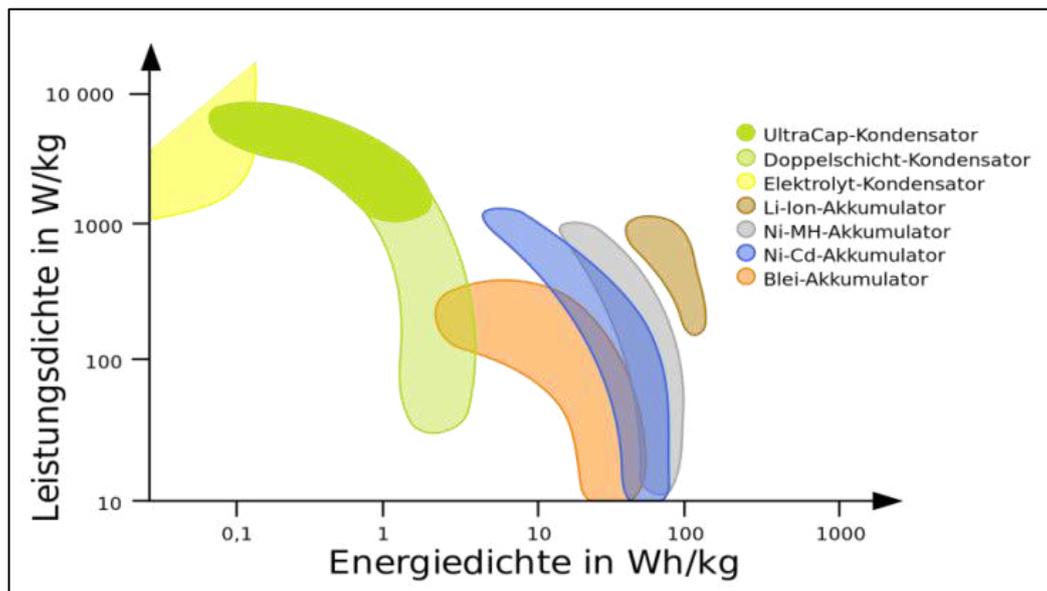


Abb.3.4: Energie- und Leistungsdichten verschiedener Speichersysteme<sup>23</sup>

Die Speicherkapazität von Batterien wird generell in Ah bzw. mAh angegeben. Sie ergibt sich aus dem Integral aus Strom und Zeit beim Lade-, bzw. Entladeprozess. Der Stromfluss verursacht eine Elektrodenveränderung, welche indirekt durch eine chemische Umwandlung zur Elektroneneinlagerung (Ladeprozess) oder Elektronenabgabe (Entladeprozess) führt. Die Materialbeschaffenheit und Größe des Speichers bestimmen dabei, wie viele Elektronen gespeichert werden können. Eine genaue Kapazitätsmessung lässt sich nur durch einen kompletten Lade- bzw. Entladeprozess bestimmen.

Die Kapazität und somit die Speicherefähigkeit einer Batterie unterliegt natürlichen Alterungsprozessen. Je älter ein Akku ist, desto weniger Ladung kann dieser aufnehmen. Fällt die Gesamtkapazität eines Akkus unter 80 % der vom Hersteller angegebenen Ladekapazität, so sollte der Akku ausgetauscht werden.

<sup>23</sup> [www.wikimedia.org](http://www.wikimedia.org)

In vielen Anwendungen spielt neben der Kapazität die Energiedichte eine Rolle. Es wird unterschieden zwischen der volumetrischen Energiedichte (Energie/Volumen) und der massenbezogenen Energiedichte (Energie/Gewicht). Die massenbezogene Energiedichte wird häufig als spezifische Energie bezeichnet. Der Nachteil von Akkus mit hoher Energiedichte ist ihr relativ gesehen oftmals überproportional hoher Preis. Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über Energiedichte, Ladewirkungsgrad und Maximalkapazität der verschiedenen Akkumodule. Der Ladewirkungsgrad gibt das Verhältnis der entnehmbaren zur im Ladeprozess aufgewendeten Energie an. Die angegebene Maximalkapazität bezieht sich auf die im Experimentiersystem enthaltenen (vollgeladenen) Akkus.

	<b>Energiedichte (Wh/kg)</b>	<b>Ladewirkungsgrad (%)</b>	<b>Maximalkapazität (mAh)</b>
NiMH-Akku	60-110	70	600
NiZn-Akku	50	65	550
LiFePo-Akku	80-140	94	200
LiPo-Akku	140-260	90	980
Blei-Akku	30	60-70	2500

Tab.3.1: Energiedichte, Ladewirkungsgrad und Maximalkapazität verschiedener Akku-Typen <sup>24</sup>

### 3.5. Der Wirkungsgrad von Batterien und Brennstoffzellen

Bei der Betrachtung des Wirkungsgrades elektrochemischer Wandler wird unterschieden zwischen Stromwirkungsgrad, Spannungswirkungsgrad, Leistungswirkungsgrad und Energiewirkungsgrad.

#### Stromwirkungsgrad

Der Stromfluss verursacht innerhalb der Batterie/Brennstoffzelle eine chemische Umwandlung der Reaktanten. Elektrische Energie wird dabei in chemische Energie umgewandelt (Ladeprozess/Wasserstofferzeugung) bzw. chemische Energie wird in elektrische Energie umgewandelt (Entladeprozess/ Wasserstoffverstromung). Aus den chemischen Reaktionen kann abgelesen werden, dass für jede Reaktion ein Elektronenfluss notwendig ist und dabei jedes Elektron eine chemische Molekülveränderung verursacht. Fließen keine Elektronen, findet auch keine Reaktion statt und somit auch keine Materialänderung. Für einen funktionsfähigen Akku bzw. Brennstoffzelle kann somit davon ausgegangen werden, dass der Stromwirkungsgrad 1 ist. Das heißt, jedes Elektron verursacht eine chemische Veränderung. Bei Brennstoffzellensystemen führen hauptsächlich Systemundichtigkeiten zu Abweichungen des idealen Stromwirkungsgrades. Bei Akkus ist die Überladung (Überschreitung der max. Zellspannung) Hauptursache für die Abweichung vom idealen Stromwirkungsgrad.

<sup>24</sup> [www.wikipedia.de](http://www.wikipedia.de)

## Spannungswirkungsgrad

Die Spannungsverluste bei einem Akku sind im Betriebsfall zum einen auf dessen Innenwiderstand ( $\eta_{Ri}$ ) zurückzuführen und zum anderen auf reaktionsbedingte elektrochemische Spannungsverluste ( $\eta_{EC}$ ). Die durch den Innenwiderstand hervorgerufenen Spannungsverluste  $\Delta U(R_i)$  steigen mit der Stromstärke. Der auf den Innenwiderstand bezogene Spannungswirkungsgrad  $\eta_{Ri}$  kann dann folgendermaßen bestimmt werden:

$$\eta_{Ri} = \frac{U_0 - \Delta U(R_i)}{U_0}$$

Der Gesamtspannungswirkungsgrad  $\eta(U)$  berechnet sich wie folgt:

$$\eta(U) = \eta_{Ri} \cdot \eta_{EC}$$

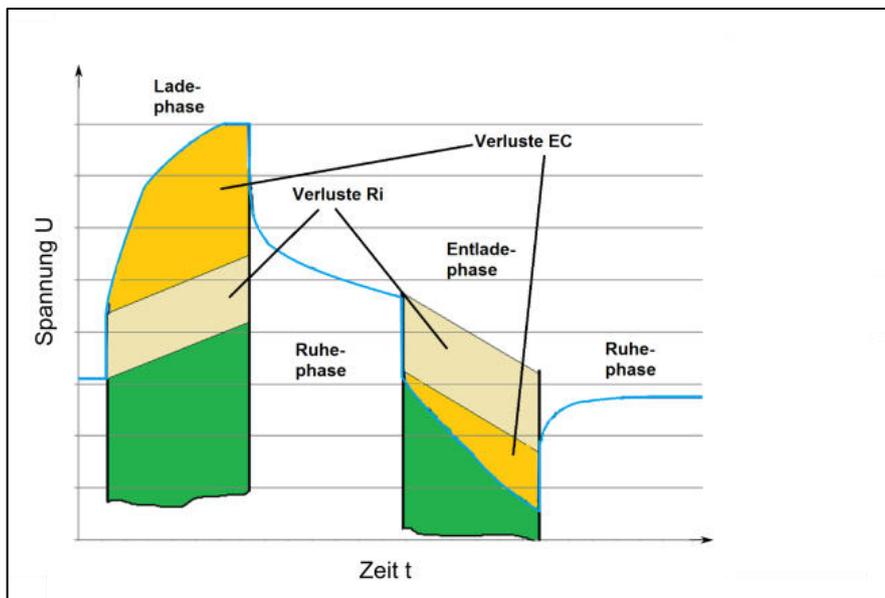


Abb.3.5: Spannungsverluste eines Akkus

## Leistungswirkungsgrad

Der Leistungswirkungsgrad  $\eta(P)$  ist das Produkt aus Stromwirkungsgrad  $\eta(I)$  und Spannungswirkungsgrad  $\eta(U)$ . Da der Stromwirkungsgrad im Allgemeinen mit 1 angenommen werden kann, ist der Leistungswirkungsgrad zumeist mit dem Spannungswirkungsgrad identisch.

$$\eta(P) = \eta(I) \cdot \eta(U)$$

## Energiewirkungsgrad

Der entscheidende Wirkungsgrad bezogen auf Batterien, ist der Energiewirkungsgrad  $\eta(W)$ . Anhand des Energiewirkungsgrads kann ermittelt werden, welcher Anteil der eingespeisten Energie als Netto-Energie zurück gewonnen werden kann.

Dafür wird in der Bilanz die Lade- und Entlade-Phase über die Zeit betrachtet. Da sich der Arbeitspunkt von Batterien während der Entladung fortlaufend ändert, ist eine komplette Lade-/Entlademessung für die Gesamtbetrachtung notwendig.

$$\eta(W) = \frac{W_{Entladen}}{W_{Laden}}$$

Die folgende Graphik zeigt einen kompletten Lade- und Entladevorgang, bei dem jeweils die gleiche Ladung Q der Batterie zugeführt und entnommen wurde.

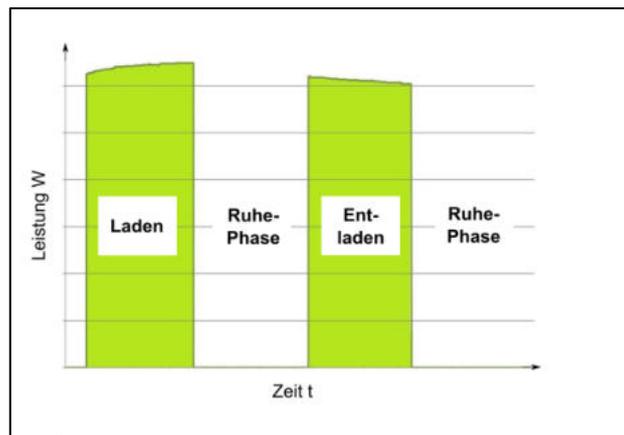


Abb.3.6: Lade- und Entladevorgang eines Akkus.

### 3.6. Temperaturverhalten eines Akkumulators

Die Eigenschaften eines Akkumulators werden von der Temperatur stark beeinflusst. Das Zusammenspiel aus entstehender interner Wärme und Abgabe an die Umgebung (Kühlung) wird als Wärmehaushalt bezeichnet.

Steigt der Stromfluss in einem Akku an, führt dies bedingt durch den Innenwiderstand der Zelle zu einer Temperaturerhöhung innerhalb des Akkus und die Reaktionsgeschwindigkeit nimmt zu. Dieses Phänomen gilt ebenso für die Selbstentladung und das Alterungsverhalten eines Akkumulators. Mit ansteigender Temperatur nimmt zunächst die Leitfähigkeit des Elektrolyten zu und die des metallischen Ableiters ab. Der Innenwiderstand der Zelle verringert sich mit steigender Temperatur, da der Anteil des metallischen Ableiters am Innenwiderstand sehr klein ist. Auch die Diffusion nimmt bei steigender Temperatur an Geschwindigkeit zu. Die Leistungsfähigkeit eines Akkumulators steigt daher zunächst mit der Temperatur. Zu hohe Temperaturen führen jedoch zu massiver Selbstentladung und einem beschleunigten Alterungsprozess. Aus diesen Gründen weisen die meisten Akkumulatoren oberhalb von 50°C eine verkürzte Lebensdauer auf.

Die Akku-Materialien sind teilweise stark temperatursensitiv. So hat die Li-Ionen- und NiMH-Technologie neben vielen positiven Eigenschaften große Nachteile in Bezug auf das zulässige Temperaturfenster. Außerhalb des angegebenen Bereichs dürfen diese Batterien nicht eingesetzt werden!

Für den bestimmungsgemäßen Einsatz von Batterien wird zwischen den Betriebsarten Lagerung, Laden und Entladen unterschieden. Nachstehende Tabelle zeigt einen Überblick der zulässigen Temperaturbereiche

verschiedener Batterietypen. Der kritischste Bereich ist der Ladebereich, in dem auf eine besondere Überwachung der Akkuzellen zu achten ist.

	Lagertemperatur (°C)	Ladetemperatur (°C)	Entladetemperatur (°C)
NiMH-Akku	-20....+50	0....+40	0....+50
LiPo-Akku	-20....+45	0....+45	-10....+60
Blei-Akku	-65....+65	-40....+65	-65....+65

Tab.3.2: Temperaturbereich verschiedener Akku-Typen

### 3.7. U-I-Kennlinien

Die bisher gezeigten Methoden zur Zustandsbestimmung einer Akku-Zelle erfordern die Messung der Leerlaufspannung. Für eine Zustandsbestimmung der Batterien im Betrieb werden U-I-Kennlinien aufgenommen und im Batteriemanagement hinterlegt.

Eine Anwendung der U-I-Kennlinie zur Ladezustandsbestimmung ist zum Beispiel im Bereich Mobiltelefonie zu finden. Im abgebildeten Diagramm (Abb.3.7) sind zwei typische Arbeitsgeraden (Standby und Telefonbetrieb) eingezeichnet. Im Standby-Modus beträgt der Batteriestrom 15 mA. Bei einer resultierenden Batteriespannung von 3,7 V ergibt dies einen Ladezustand von 50 %. Schaltet der Akku in den Telefonbetrieb, beträgt der Batteriestrom in dieser Anwendung 380 mA und die Spannung sinkt auf 3,65 V. Da die Betriebsspannung der Batterie gemessen und der Arbeitspunkt über die aktuelle Anwendung verglichen wird, bleibt die Ladezustandsanzeige wie erwünscht konstant.

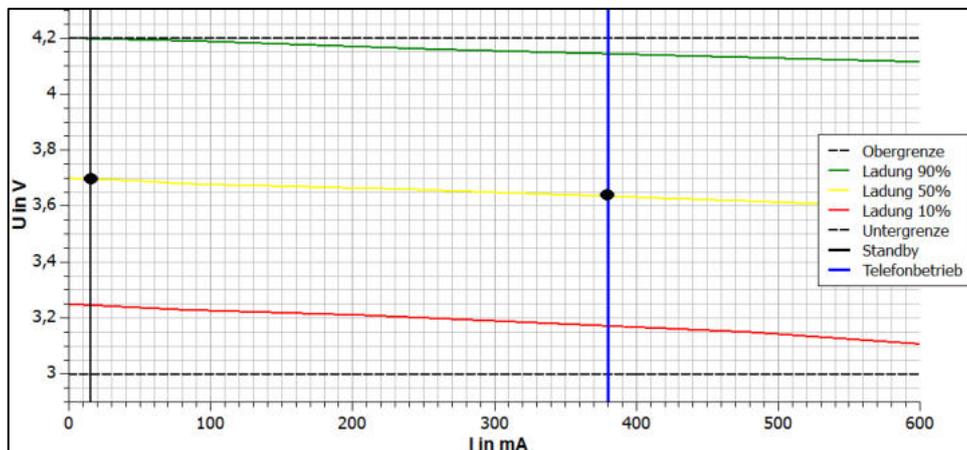


Abb.3.7: U-I-Kennlinie Akku-Zelle aus Mobiltelefonanwendung

### 3.8. Ladeverfahren

Für die jeweiligen Akkutypen existieren unterschiedlichste Ladeverfahren. Wichtig beim Ladeprozess ist vor allem der Schutz des Akkumulators vor Über- und Tiefentladung, um die Lebensdauer nicht zu beeinträchtigen. Zur Steuerung des Ladevorgangs wird im Allgemeinen ein Laderegler angewendet, der genau auf die Batterie abgestimmt sein sollte. Beim Laden von Batteriepacks müssen weitere Parameter

überwacht werden, damit die Einzelzellen nahezu identische Zustandseigenschaften (Typ, Kapazität, Leerlaufspannung, Innenwiderstand) aufweisen.

Im Experimentiersystem werden die Akkus mithilfe des ChargerModuls aufgeladen. Je nach Akku-Typ werden hierbei verschiedene Ladeverfahren und Ladeströme, bzw –spannungen angelegt. So unterscheidet sich je nach Ladeprogramm das Ladeverhalten der verschiedenen Akku-Typen grundlegend voneinander. Im Folgenden werden die verschiedenen Ladeverfahren kurz vorgestellt. Im ChargerModul finden das Konstantstrom-Ladeverfahren und sowie das IU-Ladeverfahren Anwendung.

### **Konstantstrom–Ladeverfahren (CC- Constant Current)**

Beim Konstantstrom-Verfahren wird der Akku mit einem konstanten Ladestrom aufgeladen. Dabei steigt automatisch die Spannung am Akkumulator bis zur maximalen Zellspannung an. Die Ladespannung muss dementsprechend nachgeregelt werden, um den Ladestrom konstant zu halten. Mit Erreichen der maximalen Zellspannung kann der Akkumulator keine weitere Ladung mehr speichern und eine weitere Stromzufuhr führt automatisch zur Überladung der Zelle. Dies wiederum zieht eine Erwärmung der Zelle nach sich und kann im schlimmsten Fall eine Explosion oder Brand bewirken. Um die Überladung der Zelle zu verhindern, ist daher eine Ladeüberwachung zwingend zu empfehlen.

Da das Konstantstrom-Ladeverfahren kein Abschaltkriterium besitzt, wird dieses Verfahren entweder mit dem  $\Delta U$ -Ladeverfahren oder mit dem Konstantspannungs-Ladeverfahren kombiniert. Der Ladestrom wird je nach Batterietechnologie und Größe der Einzelzelle ausgelegt. Je größer die Speicherkapazität einer Einzelzelle ist, desto größer kann auch der maximale Ladestrom eingestellt werden. In der Batterietechnologie hat sich zur Bestimmung des Zusammenhangs von Ladestrom und Speicherkapazität die Bezeichnung 1C für den Ladestrom eingebürgert. So entspricht der Ladestrom/Entladestrom 1C immer der Nennkapazität des Akkus.

#### *Rechenbeispiel:*

NiMH-Einzelzelle: Nennkapazität  $Q_N = 600\text{mAh}$   $\rightarrow 1\text{C} \equiv 600\text{mA}$

Pb-Einzelzelle: Nennkapazität  $Q_N = 2500\text{mAh}$   $\rightarrow 1\text{C} \equiv 2,5\text{A}$

LiPo-Einzelzelle: Nennkapazität  $Q_N = 980\text{mAh}$   $\rightarrow 1\text{C} \equiv 980\text{mA}$

Die einzuhaltende Ladezeit kann mithilfe der Nennkapazität  $Q_N$  und dem Ladestrom  $I_K$  über folgende Formel berechnet werden:  $t = c \cdot \frac{Q_N}{I_K}$

Der Ladewirkungsgrad wird berücksichtigt über den Akku-spezifischen Faktor  $c$ . Diese einfache Art der Berechnung der Ladezeit kann jedoch nur für kleine Ladeströme von maximal  $C/10$  angewendet werden, um eine Überladung des Akkus zu vermeiden. In der gepulsten Version existiert das Konstantstrom-Ladeverfahren als sogenanntes Puls-ladeverfahren. Bei diesem werden Ladeimpulse gesetzt, deren Länge abhängig ist von der Spannungsdifferenz zwischen Ladespannung und Akkumulatorspannung. Je stärker

der Akku aufgeladen ist, umso stärker überwiegt die Ladepause, wodurch der effektive Ladestrom mit steigendem Ladezustand verringert und eine Überladung verhindert wird.

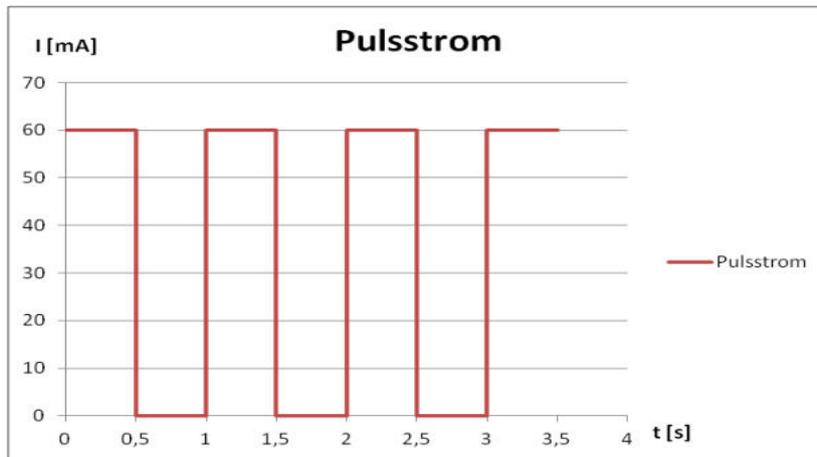


Abb.3.8: Pulsstromverfahren

### Konstantspannungs-Ladeverfahren (CV- Constant Voltage)

Beim Konstantspannungs-Ladeverfahren wird die Ladespannung während des Ladeprozesses konstant gehalten und der Strom sinkt mit steigender Ladung des Akkumulators durch die Verringerung der Spannungsdifferenz zwischen Akku und Ladegerät. Im Idealfall würde der Ladestrom bis auf null absinken, allerdings fließt in der praktischen Anwendung bei allen Akkus ein Reststrom, der abhängig ist von der Selbstentladerate. Wird die Ladespannung korrekt eingestellt, kann eine Überladung des Akkus bei diesem Ladeverfahren ausgeschlossen werden. Allerdings sollte der Ladestrom bei diesem Verfahren überwacht und begrenzt werden, da zu hohe Ladeströme den Akkumulator irreversibel schädigen oder gar in Brand setzen können.

Die maximale Ladespannung darf je nach Akku-Typ etwas über der maximalen Zellspannung liegen. Bei Überschreitung der maximalen Zellspannung findet keine elektrische Speicherung mehr statt, sodass die höhere Ladespannung nur der Beschleunigung des Ladevorgangs dient. Die folgende Tabelle beinhaltet die maximale Zell- und Ladespannungen sowie den maximalen Ladestrom der im Experimentiersystem enthaltenen Akkumodule.

	max. Zellspannung (V)	max. Ladespannung (V)	max. Ladestrom
NiMH-Akku	1,35	1,7	1C
NiZn-Akku	1,8	1,9	1C
LiFePo-Akku	3,4	3,6	4C
LiPo-Akku	4,2	4,2	1C
Blei-Akku	2,15	2,45	0,4C

Tabelle 3.3: Maximale Zellspannung, Ladespannung und Ladestrom verschiedener Akku-Typen

## **IU-Ladeverfahren (CCCV- Constant Current Constant Voltage)**

Das IU-Ladeverfahren ist eine Kombination von Konstantstrom- und Konstantspannungs-Ladeverfahren. Der Akkumulator wird dabei zuerst mit einem begrenzten konstanten Strom geladen. Der Vorteil gegenüber dem Konstantspannungs-Ladeverfahren ist, dass der hohe Anfangsladestrom begrenzt wird. Wenn die Ladeschlussspannung erreicht ist, wird der Akkumulator mit einer konstanten Spannung weiter geladen. Dabei sinkt der Ladestrom mit zunehmender Ladung. Der Laderegler beendet den Ladevorgang, wenn der gewählte minimale Ladestrom unterschritten wird.

## **Abschaltkriterium: - $\Delta U$ -Verfahren**

Viele Laderegler überwachen den Verlauf der Akku-Spannung während des Ladeprozesses. Mit steigender Ladung fällt im Allgemeinen der differentielle Widerstand am Akku-Modul ab. Der differentielle Widerstand  $r$  bezeichnet bei nichtlinearen Strom-Spannungs-Kennlinien, wie sie bei Batterien vorliegen, den Quotienten aus Spannungsänderung und dazu gehöriger Stromstärkeänderung:

$$r = \frac{dU}{dI}$$

Wenn der Akkumulator vollgeladen ist, wird die überschüssige zugeführte Energie nicht mehr chemisch gebunden und die Temperatur des Akkumulators steigt entsprechend an. Es gilt nun, je wärmer der Akkumulator wird, desto geringer wird der differentielle Widerstand, was wiederum ein Absinken der Ladespannung bewirkt. Daher wird das Verfahren auch Minus-Delta-U ( $-\Delta U$ ) Verfahren genannt.

Der Ladevorgang kann beendet werden, wenn die maximale Spannungsdifferenz erreicht ist. Typische Werte liegen bei 10-20 mV pro Zelle. Das  $\Delta U$ -Verfahren gilt allerdings als ziemlich unzuverlässig und ist in keinem Fall für Blei oder Lithium-Ionen-Zellen einsetzbar!

## **Entladeverhalten von Batterien**

Ähnlich wie beim Ladeverhalten wird bei der Beschreibung des Entladeverhaltes die Stromkapazität der Batterie herangezogen. Der angegebene Entladestrom bezieht sich dabei auf die Kapazität der Zelle. So entspricht der Entladestrom von 1C der Nennkapazität des Akkus. Das dargestellte Diagramm zeigt das Entladeverhalten eines LiPo-Akkus (900mAh) bei drei verschiedenen Belastungsszenarien. Der Akku wurde jeweils aufgeladen und anschließend mit einem Konstantstrom von 225 mA (0,25 C), 450 mA (0,5 C) und 900 mA (1 C) konstant belastet. Das Diagramm zeigt anschaulich den Spannungsverlust der Batterie über der Zeit. Leistung und Kapazität stehen bei Batterien in einem engen Verhältnis. So kann eine Batterie mit einer höheren Batteriekapazität größere Ströme und somit auch größere Leistungen liefern. Durch die Reihenschaltung von Einzelzellen kann die Spannung erhöht werden, durch die Parallelschaltung oder durch

größeres Volumen der Batterien wird der maximale Strom erhöht. Batterien werden von den Herstellern materialtechnisch ja nach Anwendung für maximale Ladekapazität oder maximale Leistung produziert. Die maximalen Entladeströme variieren im Allgemeinen zwischen 1C – 100C.

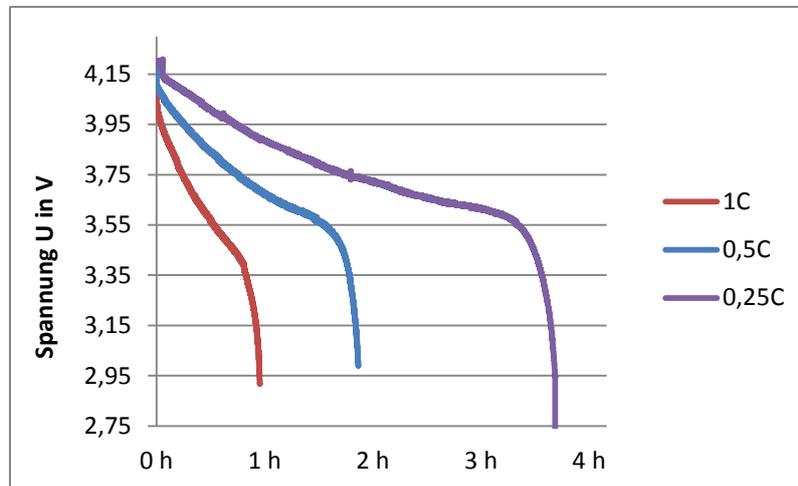


Abb.3.9: Entladekurve LiPo-Akku

### 3.9. Anwendungsbeispiele

#### 3.9.1. Packaging

Für gewisse Anwendungen, zum Beispiel in Laptops oder Elektroautos werden Betriebsspannungen gefordert, die eine Einzelzelle nicht liefern kann. Höhere Spannungen können durch eine Serienschaltung von Batterien erzeugt werden. Wenn in der Anwendung eine höhere Kapazität, beziehungsweise größere Ströme benötigt werden, dann müssen die Batterien parallel geschaltet werden.

Je nach Verschaltung der Akkus existiert eine Nomenklatur zur Bezeichnung der verschiedenen Packungsarten (siehe Abb.3.10)

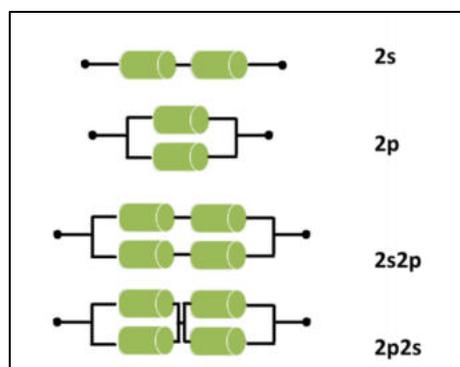


Abb.3.10: Bezeichnung der verschiedenen Packaging-Typen

**Aufgabenbeispiel:**

6 Einzelbatterien ( $U_0=3,7V$ ,  $R_i=0,1\Omega$ ) sind für die Laptopversorgung in einem Battery pack zusammengeschaltet. Drei Batterien liegen jeweils in Reihe und die beiden Blöcke werden parallel verschaltet (3s2p). Zeichnen Sie das Ersatzschaltbild für die Batterieschaltung und berechnen Sie den Gesamtersatzwiderstand  $R_i$  und die Leerlaufspannung  $U_0$  für die Batterieschaltung.

Bei der Parallel- und Reihenschaltung von Akkus müssen vor allem beim Ladevorgang bestimmte Eigenschaften der Akkus berücksichtigt werden. So müssen im speziellen Lithium-Ionen-Akkus mit einer Überwachungselektronik ausgestattet werden (BMS=Batteriemanagementsystem), um die Sicherheit im Umgang mit den Lithium-Ionen-Akkus zu erhöhen. Bei kleineren Akku-Packs handelt es sich meist um eine integrierte Schaltelektronik zum Schutz gegen Tiefentladung, Überladung sowie thermische Überlastung.

Werden mehrere Zellen in Reihe geschaltet, dann ist das sogenannte *Cell-Balancing* Teil der Überwachungselektronik. Diese gleicht den Ladezustand der Einzelzellen an, um eine Überladung zu vermeiden. Sobald die erste Zelle die Maximalspannung erreicht hat, muss der Ladestrom reduziert oder die Ladespannung beendet werden. Dazu wird die Zelle von den äußeren Kontakten getrennt, bis die Überspannung ausgeglichen ist.

Bei Unterschreitung der Minimalspannung an einer Einzelzelle muss die Entladung beendet werden. Dazu schaltet eine interne Sicherung den Akku meist nur temporär ab, sodass keine Spannung an den externen Kontakten anliegt und der Akku somit nicht weiter entladen werden kann.

### **3.9.2. Anwendung PKW**

Im folgenden Abschnitt werden Batterien in Hinblick auf Energiedichte und Kosten den herkömmlichen Energieträgern gegenübergestellt. Hauptaugenmerk wird auf die Spezialanwendung PKW gelegt.

In Abbildung 3.11 sind die spezifischen Energien verschiedener Energieträger gegenübergestellt. Es zeigt sich deutlich, dass die Energiedichten der herkömmlichen Energielieferanten wie die fossilen Brennstoffe wesentlich größer sind, als die von elektrischen Speichern, wie Batterien.

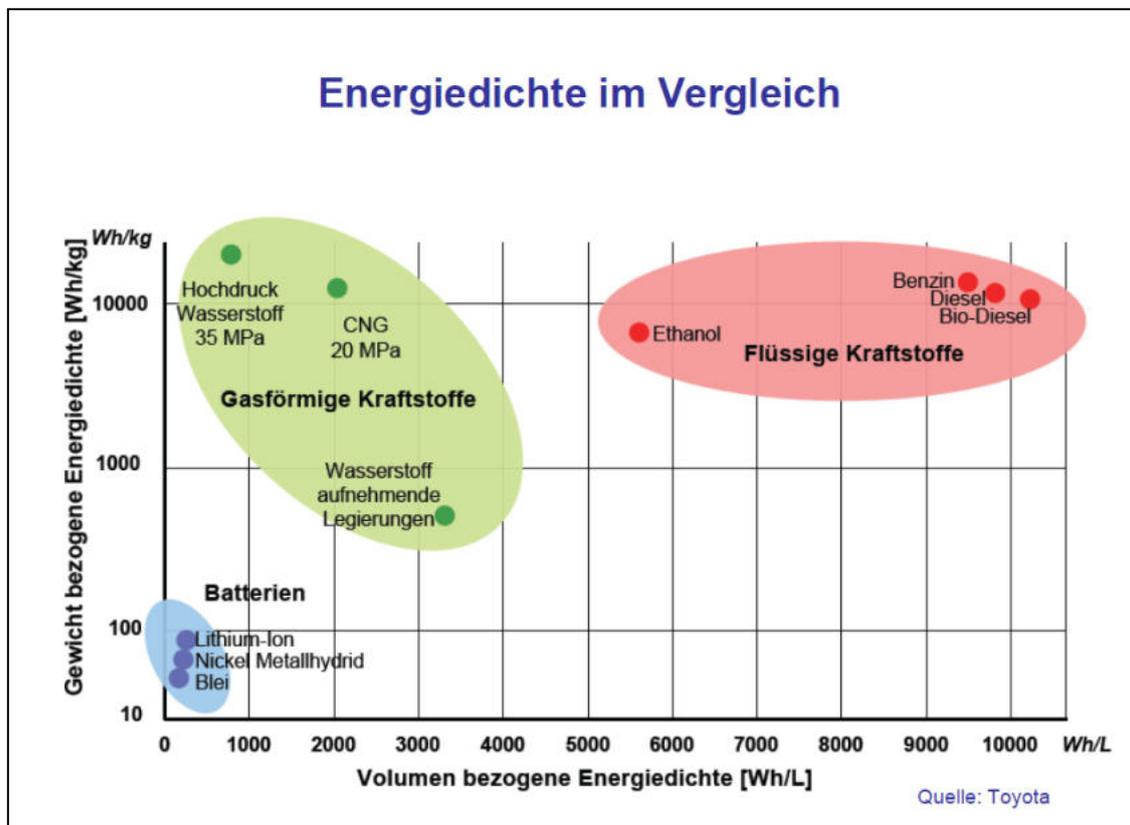


Abb.3.11: Energiedichte verschiedener Energieträger<sup>25</sup>

Beispielrechnung: Unterschied Reichweite zwischen benzinbetriebenen PKW und batteriebetriebenen Elektroauto

1) Benzin besitzt eine Energiedichte von etwa 10kWh/kg bei einem Preis von 0,16€/kWh. Der Verbrauch des PKWs liegt bei etwa **5kg** Benzin auf 100km. Der Verbrennungsmotor besitzt einen Wirkungsgrad von 20%:

$5\text{kg} \cdot 10\text{kWh/kg} \cdot 0,2 = 10\text{kWh} \rightarrow$  **10kWh** Verbrauch bei einer Reichweite von **100km**

2) Eine Autobatterie mit einem Gewicht von **100kg** besitzt eine Energiedichte von etwa 0,15kWh/kg. Damit steht eine Energie von etwa 15kWh zur Verfügung. Da eine Batterie nicht vollständig entladen werden darf, sondern nur bis zu einer Entladetiefe von 80% (= DoD, Depth of Discharge) kann die Batterie eine Energie von 12kWh liefern. Die Batterie besitzt einen Wirkungsgrad von 80%:

$12\text{kWh} \cdot 0,8 = 10\text{kWh} \rightarrow$  **9,6kWh** Verbrauch bei einer Reichweite von **96km**

Damit zeigt sich schon der große Nachteil der Elektroautos, die begrenzte Reichweite. Um eine Reichweite von 100km zu erreichen, ist eine Batterie mit einer Masse von 100kg nötig. Zur geringen Reichweite kommen die langen Ladezeiten hinzu. Um die betrachtete Batterie vollständig aufzuladen, ist eine Ladezeit von rund 5h notwendig. Ein weiterer kritischer Punkt ist die fehlende Abwärme der Batterien durch den hohen Wirkungsgrad. Benzinbetriebene PKWs nutzen die Abwärme durch den Verbrennungsmotor, um die

<sup>25</sup> Toyota

Heizung zu betreiben. Das Elektroauto muss dazu die Energie direkt aus der Batterie nutzen, was die Reichweite noch weiter verringert.

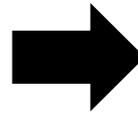
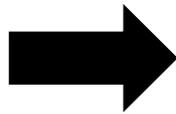
Eine weitere Beispielrechnung soll die Kosten von drei verschiedenen Antriebstechnologien gegenüberstellen:

*Beispielrechnung: Unterschied Kosten zwischen benzinbetriebenen PKW, batteriebetriebenen Elektroauto und wasserstoffbetriebenen Elektroauto*

**1) Benzin**



26



+ € 5.000  
 + € 18.750  
 -----  
 € 23.750

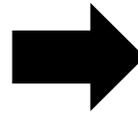
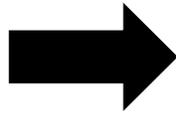
Kosten Benzinmotor: 5000€

Kosten Kraftstoff: 18.750€  
 (bei Fahrleistung 250.000 km;  
 Kraftstoffverbrauch 5 l/100 km)

**2) Batterie**



27



+ € 25.000  
 + € 6.250  
 -----  
 € 31.250

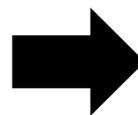
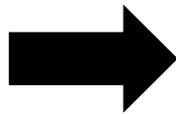
Kosten Elektromotor: 25000€

Kosten Strom: 6.250€  
 (bei Fahrleistung 250.000 km;  
 Stromverbrauch 10kWh/100 km)

**3) Wasserstoff**



www.h-tec.com



+ € 60.000  
 + € 23000  
 -----  
 € 83.000

Kosten Brennstoffzelle: 60000€

Kosten Kraftstoff: 23.000€  
 (bei Fahrleistung 250.000 km;  
 Stromverbrauch 1kg/100 km)

26 <http://www.angurten.de>

27 <http://www.zvei.org>

Es zeigt sich deutlich, dass das brennstoffzellenbetriebene Elektroauto aufgrund des immensen Preises (noch) nicht wettbewerbsfähig ist und im Moment eher eine Nischenstellung einnimmt. Die Kosten des Elektroautos sind durch die geringeren Kraftstoffkosten mit denen eines herkömmlichen, benzinbetriebenen PKWs vergleichbar. Dieser Trend wird sich vermutlich in den nächsten Jahren fortsetzen, da die Entwicklung kostengünstiger Batterien weiter vorangetrieben wird.

### 3.9.3. Energiekostenvergleich von Netzstrom und Batterien

Beim Vergleich der Kosten für Netzstrom und den Strom, welchen eine Batterie liefern kann, treten signifikante Unterschiede auf.

#### *Beispielrechnung: Kostenvergleich Netzstrom vs. Batterie*

Netzstrom: → Kosten: **0,25€/kWh**

Primärbatterien: U=1,25V Q=2500mAh Preis=0,50€ (Ladenpreis Einzelbatterie)

→ Kosten: **160 €/kWh**

Sekundärbatterien: U= 1,15V Q=2300mAh Preis = 2,50€ (Ladenpreis Einzelbatterie)

Die Kosten für einen Vollzyklus liegen Damit bei 1250€/kWh. Unter Berücksichtigung der Netzspannung, die zum Laden benötigt wird, ergeben sich bei 1000 Vollzyklen:

→ Kosten: **1,50€/kWh.**

Um mithilfe von Sekundärbatterien realistische Preise zu erreichen, muss eine Mindestanzahl an Ladezyklen erreicht werden. Bei der Wahl der Batterie sollte darauf geachtet werden, wie hoch die Ladefrequenz ist, also wie oft die Batterie geladen wird. Bei weniger als 2 Ladezyklen pro Jahr kann davon ausgegangen werden, dass die Anschaffung einer Primärbatterie günstiger ist als eine Sekundärbatterie.

In einer weiteren Rechnung soll dargelegt werden, wann und ob sich die Anschaffung einer Sekundärbatterie beim Betreiben einer Solar- oder Windanlage lohnt. Im Beispiel wird von einer Solaranlage ausgegangen, die eine Energie von 1kWh liefert. Je nachdem, ob die Energie selber verwendet (1), vollständig ins Netz einspeist (2) oder mit Hilfe von Sekundärbatterien gespeichert wird (3), ergeben sich andere Einsparbeträge.

#### *Beispielrechnung: Anschaffung einer Sekundärbatterie beim Betreiben einer Solaranlage*

(1) Beim vollständigen Eigengebrauch des Solarstromes kann bei einer erzeugten Energie von 1kWh der Netzpreis von 0,25€ eingespart werden.

(2) Bei der vollständigen Einspeisung der Solarenergie ins Stromnetz zahlt der Energieversorger einen Betrag von rund 0,16€.

(3) Bei der Speicherung des Solarstroms mit Hilfe von Batterien sollen zwei verschiedene Szenarien angenommen werden:

- a) Die Batterie soll 5000 Vollzyklen laufen bei Kosten von 200€/kWh. daraus ergibt sich ein Preis von 0,04€/kWh. Durch die Einsparungen des Netzstromes ergibt sich immerhin noch eine Einsparung von 0,21€/kWh.
- b) Geht man von einem realistischeren Szenario mit 1000 Vollzyklen und 400€/kWh aus, ergeben sich Kosten von 0,40€/kWh. Daraus ergibt sich sogar ein Verlust von etwa 0,15€/kWh. In diesem Fall lohnt sich also die Anschaffung einer Batterie nicht.

Geht man davon aus, dass reale Batterieanlagen aktuell etwa 1000€/kWh Kosten verursachen und eine Lebensdauer von etwa 2000 Vollzyklen besitzen, dann rechtfertigen die Kosten von rund 0,90€/kWh nicht die eingesparten Kosten des Netzbetreibers. Allerdings kann sich dieses Bild in Hinblick auf steigende Energiekosten und günstigere Batterietechnologien in den nächsten Jahren durchaus wandeln.

### 3.9.4. Speicherkapazität von Energieversorgungsnetzen

In einem Beispielszenario soll die Speicherkapazität von Batterien mit der des Erdgasnetzes verglichen werden.

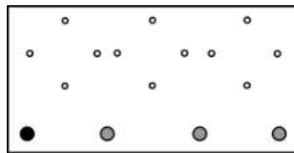
Gesamtenergiebedarf in Deutschland: 7100 GWh/d	
 <p><b>Batterien</b> 0,15 kWh/kg 500 €/kWh</p> <p>Für die Rechnung kann davon ausgegangen werden, dass etwa 10 Millionen Haushalte mit einer Batteriekapazität von 100% bei einer Energie von je 10kWh vollständig ausgeschöpft werden könnten:</p> $10 \cdot 10^6 \cdot 10kWh \cdot 100\% = 100GWh$ <p>Das bedeutet, dass die Energieversorgung Deutschlands mit Hilfe der Speicherkapazität aller Batterien nur rund 20min lang aufrechterhalten werden könnte.</p>	 <p><b>Erdgas</b> 12,0 kWh/kg 0,06 €/kWh</p> <p>Geht man von der Energiedichte von 12kWh/kg bei Erdgas aus, dann ergibt sich mit dem heutigen Erdgasspeicher Deutschlands (19Mrd.m<sup>3</sup>) eine Gesamtspeicherkapazität von 171000GWh, von denen 20% zu Strom umgewandelt werden können. Damit bleiben 34200GWh, mit denen Deutschland knapp 5 Tage lang mit Strom versorgt werden könnte. Darin zeigt sich das bestehende Problem der im Moment zu geringen Speicherkapazität der Batterietechnologien.</p>

## 4. Das Experimentiersystem leXsolar-EMobility Ready-to-go

### 4.1. Bezeichnung und Handhabung der Experimentiergeräte

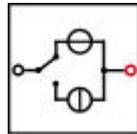
In der folgenden Auflistung werden alle im leXsolar- EMobility Ready-to-go Koffer enthaltenen Einzelteile aufgeführt. Zu jeder Komponente finden Sie die Bezeichnung mit Artikelnummer, eine Abbildung, das Piktogramm in den Versuchsaufbauten und Hinweise zur Bedienung. Mit Hilfe der Artikelnummer können Sie jedes Einzelteil separat nachbestellen.

#### leXsolar Grundeinheit EMobility 1801-07



Die Grundeinheit ist eine Steckplatine, auf der bis zu 3 Module in Reihe und parallel zueinander geschaltet werden können. Der Strom fließt über die an der Unterseite angebrachten Leitungen. Zur besseren Veranschaulichung sind die elektrischen Verbindungen auf der Grundeinheit schwarz aufgedruckt.

#### ChargerModul 9100-13



Das ChargerModul ist ein kompaktes und intuitiv zu bedienendes Universalladegerät für 6 Akkumodule, den Kondensator und Elektrolyseur. Mit den zusätzlichen Festspannungsausgängen können konstant 3V, bzw. 6V angelegt werden. Zum Betrieb muss zunächst das beiliegende Steckernetzteil in die Steckdose gesteckt und mit der Eingangsbuchse oben rechts am ChargerModul verbunden werden. Das Ladeprogramm wird mit der „+“ - und „-“ - Taste ausgewählt und durch die LEDs angezeigt. Ist das gewünschte Programm eingestellt, wird mit dem Einschalt-Button die Spannung an die Ausgangsbuchsen angelegt. Während des Ladeprozesses blinkt die Power-Enable LED im Sekundentakt und alle Tasten sind gesperrt. Durch das Drücken auf die Power-Enable Taste für 0,5s kann das Programm abgebrochen werden. Ist der Ladeprozess beendet, erfolgt ein akustisches Signal (3 laute „mittelhohe“ Pieptöne, insgesamt ca. 2 Sekunden lang) und die Power-Enable LED leuchtet durchgängig.

Beim Laden wird je nach Modul zwischen einem CC-Ladeverfahren (Constant Current, konstanter Strom) und einem CV-Ladeverfahren (Constant Voltage, konstante Spannung) unterschieden. Bei den meisten Akkumodulen wird zum Laden ein kombinierter CC/CV-Ladeprozess angewendet. Die obersten LEDs (CC/CV) zeigen an, in welchem Ladeprozess sich das ChargerModul befindet.

Bei einem offenen Ausgang (zum Beispiel wenn kein Akkumodul am Charger angeschlossen ist) erfolgen fünf hohe Pieptöne und das Ladeprogramm wird direkt abgebrochen. Liegt die Spannung des angeschlossenen Akkumoduls über der maximalen Ladespannung (weil zum Beispiel ein falscher Akku angeschlossen ist) oder unter der festgelegten Entladeschlussspannung (zum Beispiel falscher Akku oder Tiefentladung), dann wird das Ladeprogramm ebenfalls abgebrochen. Unabhängig vom angeschlossenen Modul schaltet der Charger nach 1h ab, um eine versehentliche Überladung des Akkumoduls zu vermeiden. Falls der angeschlossene Akku zu stark entladen ist und die Spannung dadurch unterhalb der festgelegten Entladeschlussspannung liegt, kann der Akku mit dem Festspannungsmodus von 3V und einem in Reihe geschalteten Widerstand von  $10\Omega$  aufgeladen werden, bis die Spannung kurz über der Entladeschlussspannung liegt.

Folgende Ladeprogramme können mithilfe des ChargerModuls ausgewählt werden:

**NiMH (AAA):**

- Ausschließlich CC-Verfahren ( $I=250\text{ mA}$ ) OHNE CV-Verfahren
- Obere Grenze für Spannung: 1,6V
- Untere Grenze für Spannung: 1V

**NiZn (AAA):**

- Zunächst CC-Ladeverfahren ( $I=250\text{ mA}$ ) bis zu einer Umschaltspannung  $U=1,8\text{ V}$
- Anschließend CV-Ladeverfahren bis zu einem Abschaltstrom von 100mA
- Obere Grenze für Spannung: 2V
- Untere Grenze für Spannung: 1,3V

**LiFePo (AAA):**

- Zunächst CC-Ladeverfahren ( $I=200\text{ mA}$ ) bis zu einer Umschaltspannung  $U=3,6\text{ V}$
- Anschließend CV-Ladeverfahren bis zu einem Abschaltstrom von 100mA
- Obere Grenze für Spannung: 3,7V
- Untere Grenze für Spannung: 2,8V

**NiMH (triple):**

- Ausschließlich CC-Verfahren ( $I=250\text{ mA}$ ) OHNE CV-Verfahren
- Obere Grenze für Spannung: 4,8V
- Untere Grenze für Spannung: 3V

**Pb:**

- Zunächst CC-Ladeverfahren ( $I=500\text{ mA}$ ) bis zu einer Umschaltspannung  $U=2,35\text{ V}$
- Anschließend CV-Ladeverfahren bis zu einem Abschaltstrom von 200mA
- Obere Grenze für Spannung: 2,45V
- Untere Grenze für Spannung: 1,8V

**LiPo:**

- Zunächst CC-Ladeverfahren ( $I=500\text{ mA}$ ) bis zu einer Umschaltspannung  $U=4,1\text{ V}$
- Anschließend CV-Ladeverfahren bis zu einem Abschaltstrom von 200mA
- Obere Grenze für Spannung: 4,3V
- Untere Grenze für Spannung: 3V

**Electrolyzer:**

- Nur CV-Ladeverfahren ( $U=2,1\text{ V}$ )

**Supercap:**

- Nur CV-Ladeverfahren mit 4V bis zum Abschaltstrom von 50mA
- Strombegrenzung 2A
- Unabhängig von Strom Abschalten nach  $t = 10\text{ min}$

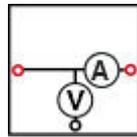
**3V:**

- Konstante Festspannung von 3V

**6V:**

- Konstante Festspannung von 6V

## AV-Modul 9100-03



Das AV-Modul ist ein kombiniertes Spannungs- und Strommessgerät. Es besitzt 3 Tasten, deren Funktionen jeweils im Display angezeigt werden. Durch das Drücken einer beliebigen Taste wird das Modul eingeschaltet. Im ausgeschalteten Zustand ist im Display das leXsolar-Logo zu sehen. Wenn das Display nichts anzeigt oder beim Betrieb „Bat“ angezeigt wird, müssen die Batterien auf der Rückseite ausgetauscht werden (2 x AA Batterien oder Akkus 1,2 bis 1,5V; Die Polarität beim Einsetzen der Batterien gemäß Markierung am Boden des Batteriefachs ist zu beachten! Beim Einlegen der Batterien dürfen die Touchfelder nicht berührt werden).

Mit der Taste rechts oben kann zwischen den 3 Modi Spannungsmessung, Stromstärkemessung und kombinierte Spannungs- und Stromstärkemessung gewechselt werden. Der Messmodus und der Anschluss der Kabel an das Modul werden durch die Schaltsymbole im Display angezeigt. Im Modus der Spannungsmessung ist zu beachten, dass kein Strom zur rechten Buchse fließt. Im kombinierten Modus kann die Spannung sowohl über die rechte als auch die linke Buchse gemessen werden. Der Einfluss des Innenwiderstands der Stromstärkemessung wird intern kompensiert. Der Messwert ist vorzeichenbehaftet. Liegt der positive Pol an einer der roten und der negative Pol an der schwarzen Buchse an, ergibt die Spannungsmessung ein positives Ergebnis. Fließt der Strom von der linken zur rechten Buchse ist die angezeigte Stromstärke positiv.

Nach 30 min ohne Tastendruck oder nach 10 min ohne Messwertveränderung schaltet sich das Modul automatisch aus. Das AV-Modul kann Spannungen bis 12 V und Stromstärken bis 2 A messen. Falls eine dieser Größen überschritten wird, unterbricht das Modul den Stromfluss und es erscheint „overvoltage“ bzw. „overcurrent“ im Display. Diese Fehlermeldung kann durch Betätigen der entsprechenden Taste bestätigt werden. Befinden sich die Messwerte wieder im zulässigen Bereich, misst das Modul weiter.

### Technische Daten:

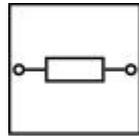
#### Spannungsmessung:

- Messbereich: 0...12 V
- Genauigkeit: 1 mV
- Automatische Abschaltung bei Überspannung >12 V (Wiedereinschalten durch Touchbutton)

#### Strommessung:

- Messbereich: 0...2 A
- Genauigkeit: 0,1 mA (0...199 mA) und 1 mA (200 mA...1 A)
- Automatiksicherung >2 A (Wiedereinschalten durch Touchbutton)
- Innenwiderstand <0,5 Ohm (0...200 mA); <0,2 Ohm (200 mA...2 A)

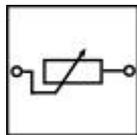
### Widerstandsmodul, 3-fach 1800-01 mit Widerstandssteckelementen



Mit Hilfe des Widerstandsmoduls können Parallelschaltungen verschiedener Widerstandsteckelemente realisiert werden. Folgende Widerstandssteckelemente sind im Experimentiersystem enthalten:

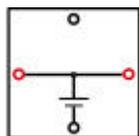
1 x R=1Ω	1800-03
2 x R=10Ω	1800-05
1 x R=100Ω	1800-04

### Potentiometermodul 1118-04



Das Potentiometermodul besteht aus einem 0-10Ω-Drehwiderstand und einem 0-100Ω-Drehwiderstand. Beide sind in Reihe geschaltet, sodass das Potentiometermodul Widerstände zwischen 0Ω bis 110Ω annehmen kann. Die Messungenauigkeit beim Einstellen eines Widerstandes liegt bei 0,5Ω beim kleineren und bei etwa 5Ω beim 100Ω-Drehwiderstand.

### Kondensatormodul 1118-11



Das Kondensatormodul besteht aus zwei in Reihe geschalteten Kondensatoren. Die maximale Spannung des Kondensatormoduls beträgt 5,4 V. Zum Aufladen sollte keine höhere Spannung als 5V angelegt werden. Zum Entladen kann der Kondensator kurzgeschlossen werden, da Sicherungen im Modul eine zu hohe Stromstärke verhindern.

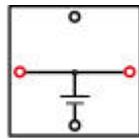
Zum schnellen Aufladen kann der Kondensator direkt an das ChargerModul angeschlossen werden. Im Experiment kann der Kondensator auch im Festspannungsmodus geladen werden.

Technische Daten:

Kapazität: 5 F

Spannung: 5,4 V

**Blei-Akkumodul 1800-13**



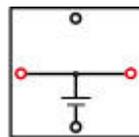
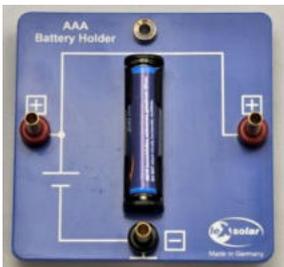
Technische Daten:

$U=1,9V \dots 2,15V$

Entladeschlussspannung: 1,9V

Max. Ladespannung 2,35V

**LiFePo-Akku AAA 1801-06 mit Halterung 1800-08**



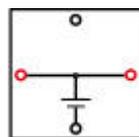
Technische Daten:

$U= 3,2V \dots 3,4V$

Entladeschlussspannung: 2,8 V

Max. Ladespannung: 3,6 V

**Lithium-Polymer (LiPo)-Akkumodul 1800-07**



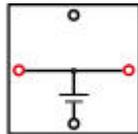
Technische Daten:

$U=3V \dots 4,2V$

Entladeschlussspannung: 3V

Max. Ladespannung: 4,2V

**NiMH-Akkumodul, einfach**



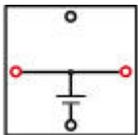
Technische Daten:

$U=1,0V \dots 1,35V$

Entladeschlussspannung: 1V

Max. Ladespannung: 1,6V

**NiMH-Akkumodul, dreifach 1118-09**



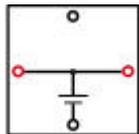
Technische Daten:

$U=3V \dots 4,05V$

Entladeschlussspannung: 3V

Max. Ladespannung: 4,8V

**NiZn-Akkumodul L2-04-102**



Technische Daten:

$U=1,3V \dots 1,8V$

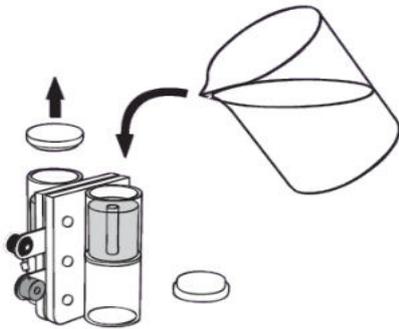
Entladeschlussspannung: 1,3V

Max. Ladespannung: 1,9V

## Reversible Brennstoffzelle L2-06-067 mit Destilliertem Wasser 1800-15



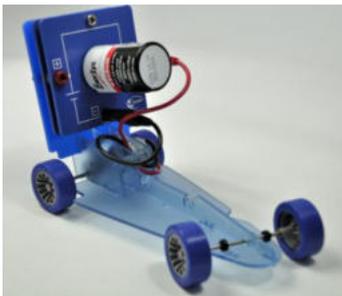
Die reversible Brennstoffzelle besteht aus einem Elektrolyseur und einer Brennstoffzelle. Zum Befüllen der reversiblen Brennstoffzelle sollte folgendermaßen vorgegangen werden:



1. Befülle die rev. Brennstoffzelle mit destilliertem Wasser wie in nebenstehender Abbildung gezeigt.
2. Fülle beide Speicherzylinder bis zum oberen Ende des Röhrchens im Inneren des Zylinders mit destilliertem Wasser auf.
3. Klopfe die rev. Brennstoffzelle leicht auf den Tisch.
4. Fülle weiter destilliertes Wasser nach, bis es durch die Röhrchen läuft.
5. Verschließe die Speicherzylinder mit den Stopfen und drehe die Zelle für den Betrieb wieder um. (Stopfen müssen für den Betrieb unten liegen)

Zur schnellen Erzeugung von Wasserstoff kann die Brennstoffzelle an das ChargerModul (Ladeprogramm „Electrolyzer“) angeschlossen werden.

## Elektro-Modellfahrzeug 1801-02



Mithilfe des beigefügten Elektro-Modellfahrzeugs können die Eigenschaften der verschiedenen Akkumodule auf sehr anschauliche Art und Weise aufgezeigt werden.

Dazu wird zunächst die zugehörige Modulplatte in die Aussparungen am hinteren Teil des Autos gesteckt. Auf dieser Modulplatte können dann die Akkumodule befestigt werden. Die Brennstoffzelle kann direkt auf dem Elektroauto mithilfe der Aussparungen befestigt werden.

Zum Betrieb des Elektroautos muss dieses zum Schluss elektrisch verbunden werden mit dem jeweiligen Akkumodul. Dazu stecken Sie zunächst ein Kabel in die zugehörige Buchse (Polarität beachten) und setzen das Auto auf dem Boden ab. Nun kann das zweite Kabel eingesteckt und das Auto losgelassen werden.

Anhand der Einstellung der vorderen Radachse kann die Richtung des Autos bestimmt werden (geradeaus oder Kreisbahn).

## 4.2. Allgemeine Hinweise zum sicheren Umgang mit Akkus und Ladegeräten

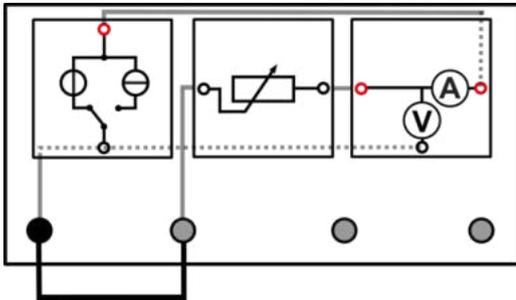
- Akkus und Ladegeräte sind kein Spielzeug! Lassen Sie Akkus daher nicht offen herumliegen, es besteht die Gefahr, dass Teile der Akkus verschluckt werden. In diesem Fall muss sofort ein Arzt aufgesucht werden.
- Akkus dürfen **niemals** kurzgeschlossen, zerlegt oder ins Feuer geworfen werden aufgrund von Brand- und Explosionsgefahr!
- Ausgelaufene oder beschädigte Akkus können Verätzungen verursachen, in diesem Fall sollten die Akkus nur mit Schutzhandschuhen berührt werden.
- Herkömmliche nicht wieder aufladbare Batterien dürfen nicht aufgeladen werden aufgrund von Brand- und Explosionsgefahr. Sie müssen ordnungsgemäß entsorgt werden, wenn sie entladen sind.
- Akkus dürfen nicht feucht oder nass werden.
- Beim Laden eines Akkus muss auf die richtige Polung geachtet werden, da sonst Brand- und Explosionsgefahr besteht.
- Akkus, die noch heiß sind, zum Beispiel durch hohe Entladeströme, sollten nicht geladen werden. Der Akku sollte zuerst auf Zimmertemperatur abkühlen.
- Laden/Entladen Sie niemals beschädigte, ausgelaufene oder verformte Akkus aufgrund von Brand- und Explosionsgefahr.
- Akkupacks sollten niemals aus unterschiedlichen Zellen zusammengestellt werden!
- Die Akkus müssen etwa alle drei Monate nachgeladen werden, da es ansonsten zu einer sogenannten Tiefentladung kommt, welche die Akkus unbrauchbar macht.
- Nach dem vollständigen Aufladen sollten die Akkus vom Ladegerät getrennt werden.
- Die Außenhülle eines Akkus darf aufgrund von Brand- und Explosionsgefahr niemals beschädigt werden.
- Beim Laden sollten Akku und Ladegerät auf nicht brennbaren und hitzebeständigen Oberflächen platziert werden.
- Beim Laden sollte aufgrund von Hitzeentwicklung eine ausreichende Belüftung gewährleistet sein. Akku und Ladegerät dürfen nicht abgedeckt werden.
- Laden oder Entladen Sie Akkus niemals unbeaufsichtigt.
- Die Akkus sollten niemals zerlegt oder beschädigt werden. Ebenso sollte jegliche mechanische Belastung des Akkus vermieden werden.
- Die Akkus dürfen nicht überhitzen, sie sollten daher nicht neben Wärmequellen platziert werden und vor direkter Sonneneinstrahlung geschützt werden.
- Entsorgen Sie den Akku umweltgerecht.
- Verwenden Sie zum Aufladen eines Akkus mit Lithiumtechnik nur ein dafür geeignetes Ladegerät. Herkömmliche Ladegeräte für NiCd-, NiMH- oder Bleiakkus dürfen nicht verwendet werden, es besteht Brand- und Explosionsgefahr!

### 4.3. Musterlösungen der Experimente

Alle Aufgabentypen enthalten Musterlösungen und sind als Möglichkeiten für die Verwendung zu verstehen. Die Experimente gliedern sich in Vorversuche und die eigentlichen EMobility-Versuche. Die Vorversuche dienen dazu, dass die Schüler technische Eigenschaften einzelner Komponenten kennenlernen, um deren Zusammenspiel in den EMobility-Versuchen zu erklären. Außerdem sind die Vorversuche wichtig, um den Umgang mit den Experimentierkomponenten kennenzulernen.

Die EMobility-Versuche sind zum Teil komplex. Die Versuchsaufbauten umfassen sehr viele verschiedene Komponenten, sodass oftmals Fehlerquellen vorhanden sind. Es ist daher besonders darauf zu achten, dass die Schüler die Anleitungen und Aufbauten sehr gewissenhaft umsetzen. Dies schränkt zwar die Freiheit der Schüler beim Experimentieren ein, jedoch ist es notwendig, um vergleichbare und sinnvolle Ergebnisse zu erhalten.

#### Hinweis zu den Versuchsskizzen:



Die Leitungsabschnitte auf der Grundeinheit, welche zum Stromfluss beitragen, sind in den Versuchsskizzen grau dargestellt. Von Modulen verdeckte Linien werden gestrichelt abgebildet. Dies soll zum besseren Verständnis der Schaltung beitragen. Die Laborkabel, welche extra eingesteckt werden müssen, sind schwarz und etwas dicker dargestellt (siehe Beispiel links).

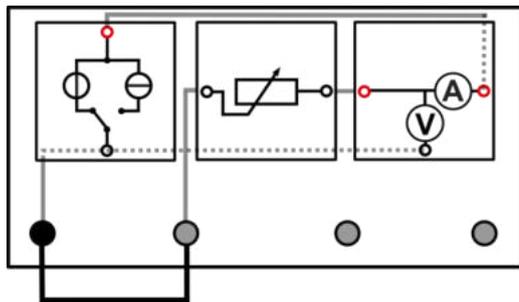
Versuchsanleitungen ohne eingetragene Musterlösungen finden Sie im separaten Schülerheft auf der leXsolar-CD als pdf- und als word-Datei (docx). Mit dem Kauf des Produkts erwerben Sie das Recht zur freien Verwendung der Anleitungen für ihren Unterricht. Dies umfasst auch die Entnahme einzelner Textpassagen oder Abbildungen aus der word-Datei (unter Angabe der Quelle).

## 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 42.
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 44.
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.

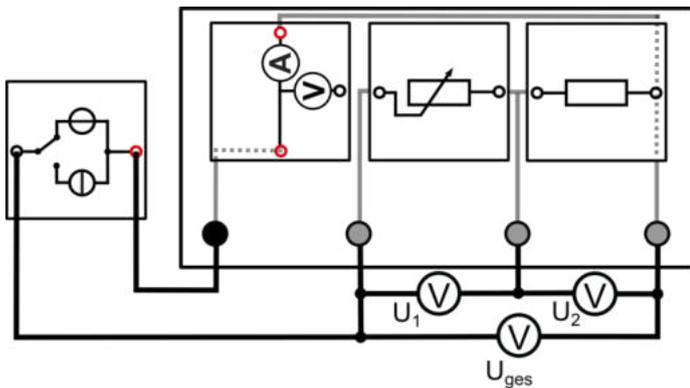
Der Widerstand  $R$  stimmt mit dem Quotienten  $U/I$  überein. Daraus lässt sich die Gleichung für den allgemeinen ohmschen Widerstand  $R$  ableiten:  $R=U/I$ .

## 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
- 1 Widerstandssteckelement (R=100Ω)
- 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 42.
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 44.

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

### Messwerte

$R_S$ (Ω)	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
$R_{ges}=U_{ges}/I$ (Ω)	195,4	178,6	159,2	139,5	118,3



## 1.2 Reihenschaltung von ohmschen Widerständen

## Auswertung

1. Berechnen Sie jeweils den Quotienten  $R_{\text{ges}} = U_{\text{ges}}/I$  und tragen Sie die Werte in die Tabelle ein.
2. Berechnen Sie jeweils die Summe der Einzelspannungen ( $U_1, U_2$ ) und vergleichen Sie diese mit der Spannung über beiden Widerständen ( $U_{\text{ges}}$ ).
3. Erläutern Sie den Einfluss, den die Widerstände auf die Stromstärke  $I$  und die Spannungen  $U_1, U_2$  und  $U_{\text{ges}}$  haben.
4. Erläutern Sie den Zusammenhang zwischen dem Gesamtwiderstand  $R_{\text{ges}}$  und den Einzelwiderständen. Formulieren Sie, ausgehend von Ihren Messergebnissen eine Gesetzmäßigkeit für die Berechnung des Gesamtwiderstandes bei der Reihenschaltung von Widerständen.

1.

	$U_1 + U_2$	$U_{\text{ges}}$
$R_{\text{Pot}} = 100\Omega / R_{\text{S}} = 100\Omega$	6,0	6,0
$R_{\text{Pot}} = 80\Omega / R_{\text{S}} = 100\Omega$	6,0	6,0
$R_{\text{Pot}} = 60\Omega / R_{\text{S}} = 100\Omega$	6,0	6,0
$R_{\text{Pot}} = 40\Omega / R_{\text{S}} = 100\Omega$	6,0	6,0
$R_{\text{Pot}} = 20\Omega / R_{\text{S}} = 100\Omega$	6,0	6,0

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

2.

Je größer die Widerstände, desto kleiner die Stromstärke. Je größer die Summe der beiden Widerstände, desto kleiner die Stromstärke. Wenn beide Widerstände gleich groß sind, fällt an beiden die gleiche Spannung ab. Bei einem großen und einem kleinen Widerstand fällt eine höhere Spannung am größeren Widerstand ab. Die Gesamtspannung bleibt konstant.

3.

Der Gesamtwiderstand ergibt sich annähernd aus der Summe der Einzelwiderstände. Für eine Reihenschaltung von Widerständen ergibt sich deshalb folgende Gesetzmäßigkeit:

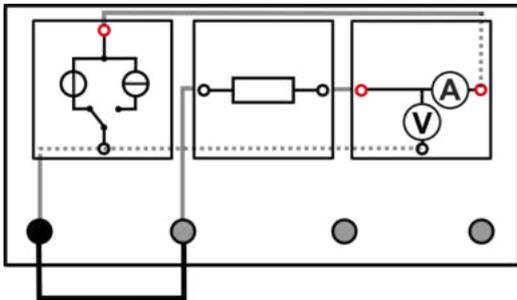
$$R_{\text{ges}} = R_1 + R_2 + \dots + R_n \quad (n \dots \text{Gesamtzahl der Widerstände})$$

## 1.3 Parallelschaltung von ohmschen Widerständen

### Aufgabe

Untersuchen Sie die Parallelschaltung von ohmschen Widerständen

### Aufbau



### Benötigte Geräte

- 1 Grundeinheit
- 1 ChargerModul
- 1 Widerstandsmodul, 3-fach
- 3 Widerstandssteckelemente  
(2 x R=10Ω, 1 x R=100Ω)
- 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 3V. Hinweise zur Handhabung finden Sie auf Seite 42.
2. Beginnen Sie mit dem einzelnen Widerstandssteckelement R=10Ω. Verwenden Sie das AV-Modul im Strom-Spannungs-Modus und messen Sie die Spannung U und Stromstärke I.
3. Wiederholen Sie die Messung für die Parallelschaltung folgender Widerstände:
  - R<sub>1</sub>=10Ω / R<sub>2</sub>=10Ω
  - R<sub>1</sub>=10Ω / R<sub>2</sub>=100Ω
  - R<sub>1</sub>=10Ω / R<sub>2</sub>=10Ω / R<sub>3</sub>=100Ω
4. Notieren Sie ihre Messwerte in einer Tabelle.

### Messwerte

	R <sub>1</sub> =10Ω	R <sub>1</sub> =10Ω / R <sub>2</sub> =10Ω	R <sub>1</sub> =10Ω / R <sub>2</sub> =100Ω	R <sub>1</sub> =10Ω / R <sub>2</sub> =10Ω / R <sub>3</sub> =100 Ω
U (V)	2,9	2,9	2,9	2,8
I (mA)	283,3	560,0	311,5	587,0
R <sub>ges</sub> =U/I (Ω)	10,2	5,2	9,3	4,8

### Auswertung

1. Berechnen Sie den Quotienten R<sub>ges</sub>=U/I (Ω) und tragen Sie Ihre Werte in die Tabelle ein.
2. Welchen Einfluss haben die Widerstände auf die Spannung U und die Stromstärke I?
3. Formulieren Sie, ausgehend von Ihren Messergebnissen eine Gesetzmäßigkeit für die Berechnung des Gesamtwiderstandes bei der Parallelschaltung von Widerständen.

Je mehr gleiche Widerstände parallel geschaltet sind, desto kleiner wird der Gesamtwiderstand. Für die Parallelschaltung von Widerständen ergibt sich folgende Gesetzmäßigkeit (n=Gesamtzahl der Widerstände):

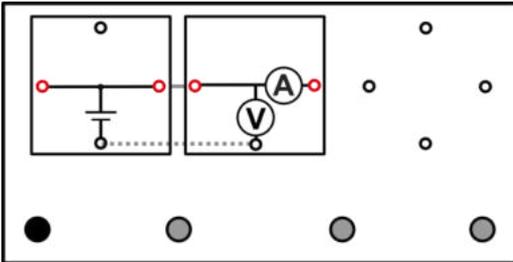
$$\frac{1}{R_{ges}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}$$

## 2.1 Die Nennspannung und Kapazität von Spannungsquellen

### Aufgabe

Bestimmen Sie die Leerlaufspannung von Einzelzellen.

### Aufbau



### Benötigte Geräte

- 1 Grundeinheit
- 1 AV-Modul
- 1 Akkumodul NiMH, einfach
- 1 Akkumodul Pb
- 1 Akkumodul LiPo
- 1 Akkumodul NiZn
- 1 Akkumodul LiFePo

### Durchführung

1. Bauen Sie den Versuch entsprechend dem Schaltplan mit dem jeweiligen Akku-Modul auf.
2. Messen Sie die Leerlaufspannung der Spannungsquellen  $U_0$  und tragen Sie Ihre Messwerte in die Tabelle ein. Verwenden Sie das AV-Modul im Spannungsmodus.

### Auswertung

1. Nutzen Sie die untenstehende Abbildung (Diagramm 2.1), um den Ladezustand der Spannungsquellen zu bestimmen und tragen Sie in die Tabelle den prozentualen Wert ein.
2. Berechnen Sie die Restkapazität mit Hilfe der Ladezustandsbestimmung und der angegebenen maximalen Kapazität. Die Größen stehen dabei in folgendem Verhältnis:

$$\frac{\text{Restkapazität}}{\text{Maximalkapazität}} = \frac{\text{Ladezustand in \%}}{100}$$

3. Berechnen Sie die benötigte Batteriekapazität, um ein Radio mit einer Leistung von 20W für eine Dauer von 3h mit einer Batteriespannung von 12V zu betreiben.
4. Einer Starterbatterie wurde bei Entladung in 5h eine Kapazität von 40Ah entnommen. Berechnen Sie die Stromstärke unter der die Batterie entladen wurde.

### Messwerte

Akku-Modul	$U_0$ in V	Zustand in %
NiMH	1,25	71
NiZn	1,70	80
LiFePo	3,30	50
Pb	1,99	36
LiPo	3,52	43



## 2.1 Die Nennspannung und Kapazität von Spannungsquellen

### Auswertung

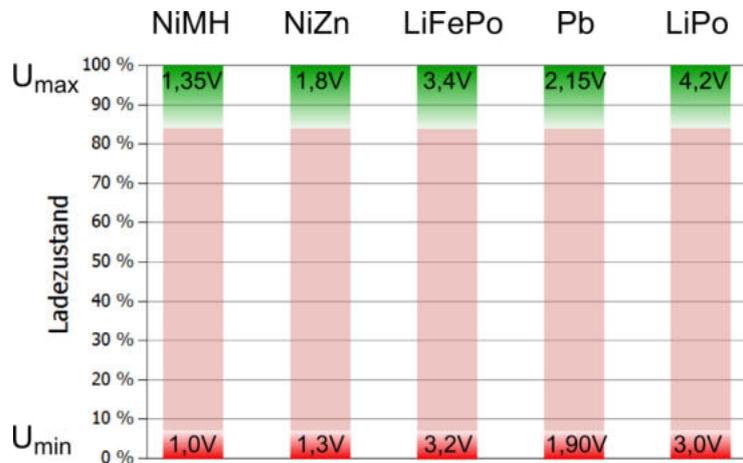


Diagramm 2.1: Ladezustandsbestimmung von Akkumodulen

Zellentyp	Kapazität
NiMH-Akku	600mAh
NiZn-Akku	550mAh
LifePo-Akku	200mAh
Blei-Akku	2500mAh
LiPo-Akkumodul	980mAh

Tabelle 2.1: Maximale Kapazität der Akku-Module

2.

NiMH:	$\frac{x}{600mAh} = \frac{71}{100} \rightarrow x = 426mAh$
NiZn:	$\frac{x}{550mAh} = \frac{80}{100} \rightarrow x = 440mAh$
LiFePo:	$\frac{x}{200mAh} = \frac{50}{100} \rightarrow x = 100mAh$



## 2.1 Die Nennspannung und Kapazität von Spannungsquellen

## Auswertung

2.

Pb:	$\frac{x}{2500mAh} = \frac{36}{100} \rightarrow x = 900mAh$
LiPo:	$\frac{x}{980mAh} = \frac{43}{100} \rightarrow x = 421mAh$

3. Zur Berechnung der benötigten Kapazität wird folgendes Vorgehen empfohlen:

- Zuerst wird der benötigte Gesamtleistungsbedarf in Wh ermittelt.
- Zu diesem Bedarf addieren Sie eine Kapazitätsreserve von 30%.
- Dieser Wert wird anschließend durch die Batteriespannung dividiert. Das Ergebnis gibt die Batteriekapazität in Ah an.
- Um eine Tiefenentladung zu vermeiden, sollte die Batterie nur um 50% entladen werden, weshalb die ermittelte Kapazität mit dem Sicherheitsfaktor 2 multipliziert werden sollte.

$P_{\text{Radio}} = 20W, \text{Zeit } t = 3h \rightarrow \text{Gesamtleistungsbedarf} = 60Wh$
$\text{Kapazitätsreserve } 30\% \rightarrow \text{Gesamtleistungsbedarf} = 60Wh * 1,3 = 78Wh$
$\text{Batteriekapazität} = \frac{78Wh}{12V} = 6,5Ah$
$\text{Sicherheitsfaktor } 2: \rightarrow \text{Batteriekapazität} = 6,5Ah \cdot 2 = \underline{\underline{13Ah}}$

4.

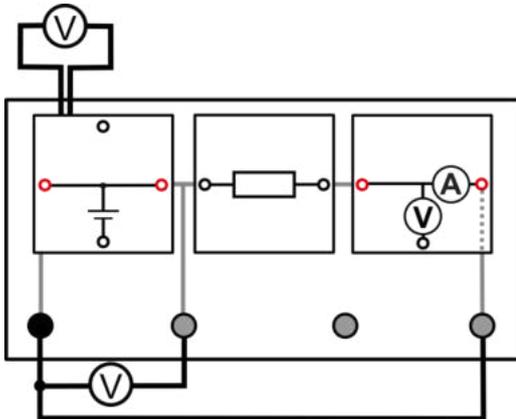
$\text{Stromstärke } I = \frac{\text{Batteriekapazität } Q}{\text{Zeit } t} = \frac{40Ah}{5h} = \underline{\underline{8A}}$
---

## 2.2 Die Vierpunkt-Messung

### Aufgabe

Ermitteln Sie den Widerstandswert der integrierten PTC-Sicherung der Spannungsquellen mit Hilfe der Vier-Punkt-Messung.

### Aufbau



### Benötigte Geräte

- 1 Grundeinheit
- alle Akkumodule
- 1 AV-Modul
- 1 Widerstandsmodul 3-fach
- 1 Widerstands-Steckelement (10Ω)
- 3 Laborkabel

*Zusätzlich benötigt:*

- 1 Spannungsmessgerät
- 1 Akku-Adapterkabel

### Durchführung

1. Bauen Sie den Versuch entsprechend dem Schaltplan mit dem jeweiligen Akku-Modul auf. Fügen Sie das Widerstandssteckelement noch nicht in das Widerstandsmodul ein. Das AV-Modul auf der Grundeinheit wird im Strom-Modus betrieben. Die Spannung wird mit Hilfe des Digitalmultimeters gemessen.
2. Schließen Sie nun den Stromkreis, indem Sie den Widerstand von 10Ω aufstecken und messen Sie zuerst die Spannung  $U_1$  sowie den Strom  $I_{Last}$ . Entfernen Sie anschließend das Widerstandssteckelement, um eine Entladung des Akkumoduls zu vermeiden. Tragen Sie ihre Messwerte in die Tabelle ein.
3. Verbinden Sie das Akku-Adapterkabel mit dem Akkumodul und dem Spannungsmessgerät. Der schwarze Plug des Adapterkabels wird dazu in die kleine Buchse an der Seite (oben links) des Akku-Moduls eingesteckt.
4. Stecken Sie das Widerstandssteckelement wieder ein und messen Sie die Spannung  $U_2$  (über das Adapterkabel). Tragen Sie ihre Messwerte in die Tabelle ein.

### Messwerte

	$U_1$ in V	$U_2$ in V	$I_{Last}$ in mA	$R_{PTC}$ in mΩ
NiMH-Akkumodul, einfach	1,22	1,23	110	90,9
NiZn-Akkumodul	1,63	1,65	150	133,3
LiFePo-Akkumodul	3,18	3,24	290	206,9
Blei-Akkumodul	1,93	1,97	180	222,2
Lithium-Polymer-Akkumodul	3,40	3,45	310	161,3
NiMH-Akkumodul, dreifach	3,37	3,48	300	366,7

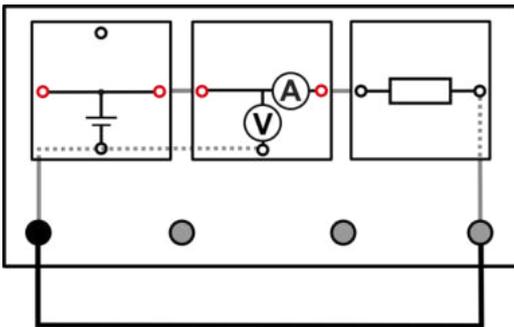


## 2.3 Der Innenwiderstand von Spannungsquellen

### Aufgabe

Ermitteln Sie den Innenwiderstand der Ihnen zur Verfügung stehenden Spannungsquellen.

### Aufbau



### Benötigte Geräte

- 1 Grundeinheit
- alle Akku-Module
- 1 AV-Modul
- 1 Widerstandsmodul, 3-fach
- 1 Widerstands-Steckelement (10Ω)
- 1 Laborkabel

### Durchführung

1. Bauen Sie den Versuch entsprechend dem Schaltplan mit dem jeweiligen Akku-Modul auf.
2. Messen Sie zunächst die Leerlaufspannung der Spannungsquellen  $U_0$  ohne den Widerstand und tragen Sie Ihre Messwerte in die Tabelle ein.
3. Stecken Sie anschließend den Widerstand auf und messen Sie die Spannung  $U_{\text{Last}}$  und den Strom  $I_{\text{Last}}$ . Das AV-Modul wird zum Messen dieser Werte im Strom-Spannungs-Modus betrieben.

**Hinweis:** Für die Innenwiderstandbestimmung müssen noch die Kontaktwiderstände  $R_{\text{ü}}$  von dem errechneten Wert abgezogen werden. Die Kontaktwiderstände sind in der Tabelle (siehe Messwerte) mit angegeben.

### Auswertung

1. Ermitteln Sie den Innenwiderstand  $R_i$  der Spannungsquellen und tragen Sie diesen ebenfalls in die Tabelle ein.

**Hinweis:** Der Innenwiderstand der Zellen wird mithilfe folgender Formel berechnet:

$$R_i = \frac{U_0 - U_{\text{Last}}}{I_{\text{Last}}} - R_{\text{ü}}$$

2. Vergleichen Sie die Spannung der Spannungsquellen untereinander.
3. Berechnen Sie, wieviel Prozent seiner Leistung das dreifache NiMH-Akkumodul für die eigene Erwärmung im vorliegenden Beispiel verbraucht.
4. Eine Starterbatterie hat eine Ruhespannung  $U_0 = 12\text{V}$  und einen Innenwiderstand  $R_i = 20\text{ m}\Omega$ . Es wird ein externer Starter mit  $60\text{ m}\Omega$  Widerstand angelassen.
  - a) Berechnen Sie die Stromstärke beim Startvorgang.
  - b) Berechnen Sie den Spannungsfall an den Klemmen beim Starten.



## 2.3 Der Innenwiderstand von Spannungsquellen

## Messwerte

	$U_0$ in V	$U_{\text{Last}}$ in V	$I_{\text{Last}}$ in mA	$R_i$ in $m\Omega$	$R_{\text{ü}}$ in $m\Omega$
NiMH-Akkumodul, einfach	1,25	1,24	110	40,9	50
NiZn- Akkumodul	1,70	1,64	150	350,0	50
LiFePo- Akkumodul	3,34	3,24	290	294,8	50
Blei-Akkumodul	1,99	1,98	180	50,6	5
Lithium-Polymer-Akkumodul	3,51	3,45	300	150,6	50
NiMH-Akkumodul, dreifach	3,75	3,42	300	880	220

## Auswertung

1.

NiMH,einfach:	$R_i = \frac{1,25V - 1,242V}{0,11A} - 0,05\Omega = \underline{\underline{40,9m\Omega}}$
NiZn:	$R_i = \frac{1,70V - 1,64V}{0,15A} - 0,05\Omega = \underline{\underline{350,0m\Omega}}$
LiFePo:	$R_i = \frac{3,34V - 3,24V}{0,29A} - 0,05\Omega = \underline{\underline{294,8m\Omega}}$
Pb:	$R_i = \frac{1,99V - 1,98V}{0,18A} - 0,005\Omega = \underline{\underline{50,6m\Omega}}$
LiPo:	$R_i = \frac{3,51V - 3,45V}{0,30A} - 0,05\Omega = \underline{\underline{150,6m\Omega}}$
NiMH,dreifach:	$R_i = \frac{3,75V - 3,42V}{0,30A} - 0,220\Omega = \underline{\underline{880,0m\Omega}}$

2.

Spannungsquellen die aus einer Zelle bestehen, besitzen einen kleineren Innenwiderstand als Spannungsquellen die aus mehreren Zellen bestehen. Je größer die Fläche der Einzelzelle, desto kleiner der Innenwiderstand.



## 2.3 Der Innenwiderstand von Spannungsquellen

## Auswertung

3.

Der Innenwiderstand der Zelle beträgt  $880\text{m}\Omega$ . Der Lastwiderstand beträgt  $10\Omega$

Damit werden  $\frac{0,88\Omega}{0,88\Omega+10\Omega} \cdot 100\% = \underline{\underline{8,1\%}}$  der abgegebenen Leistung allein für die Erwärmung des

Akkus aufgewendet.

4.

a) Zur Berechnung der Stromstärke muss der Innenwiderstand der Batterie  $R_i$  und der Widerstand des Starters  $R_s$  berücksichtigt werden. Da es sich um eine Reihenschaltung handelt, werden beide Widerstände zu einem Gesamtwiderstand addiert:

$$I = \frac{U_0}{R_i + R_s} = \frac{12\text{V}}{0,02\Omega + 0,06\Omega} = \underline{\underline{150\text{A}}}$$

b) Der Spannungsabfall an den Klemmen beim Starten wird durch den Innenwiderstand der Batterie hervorgerufen:

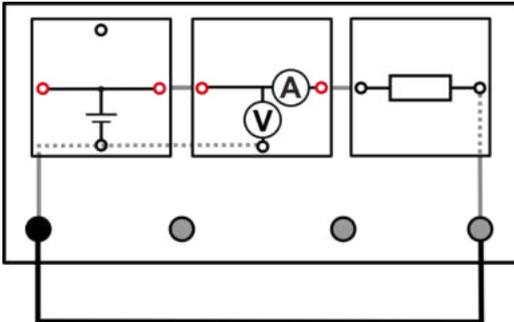
$$U_i = R_i \cdot I = 0,02\Omega \cdot 150\text{A} = \underline{\underline{3\text{V}}}$$

## 2.4 Reihenschaltung von Spannungsquellen

### Aufgabe

Untersuchen Sie das Verhalten von Spannungsquellen, wenn Sie diese einzeln bzw. in Reihe betrachten!

### Aufbau



### Benötigte Geräte

- 1 Grundeinheit
- 1 Akkumodul NiMH, einfach
- 1 Akkumodul NiMH, dreifach
- 1 AV-Modul
- 1 Widerstandsmodul, 3-fach
- 2 Widerstands-Steckelemente (2 x 10Ω)
- 1 Laborkabel

### Durchführung

1. Bauen Sie den Versuch entsprechend dem Schaltplan zunächst mit dem einfachen NiMH-Modul auf. Schalten Sie beide Widerstandssteckelemente parallel, um einen Lastwiderstand von 5Ω zu erreichen. Stecken Sie das Widerstandsmodul noch nicht auf, um eine Entladung des Akku-Moduls zu vermeiden.
2. Messen Sie zunächst die Leerlaufspannung der Spannungsquelle  $U_0$  ohne den Widerstand und tragen Sie Ihre Messwerte in die Tabelle ein.
3. Stecken Sie nun das Widerstandsmodul auf und messen Sie anschließend die Spannung  $U_{\text{Last}}$  und den Strom  $I_{\text{Last}}$ . Das AV-Modul wird im Stromstärke-Spannungs-Modus betrieben.
4. Wiederholen Sie den Versuch mit zwei weiteren einzelnen NiMH-Akkus. Verwenden Sie anschließend die untersuchten Einzelzellen im dreifachen NiMH-Modul und messen Sie erneut die oben genannten Größen.

### Messwerte

#### Einzelzelle:

		$U_0$ in V	$U_{\text{Last}}$ in V	$I_{\text{Last}}$ in mA
1. Zelle	( $R_{\text{ü}} = 50 \text{ m}\Omega$ )	1,24	1,21	210
2. Zelle	( $R_{\text{ü}} = 50 \text{ m}\Omega$ )	1,24	1,21	210
3. Zelle	( $R_{\text{ü}} = 50 \text{ m}\Omega$ )	1,24	1,21	210

#### Mehrfachzelle:

		$U_0$ in V	$U_{\text{Last}}$ in V	$I_{\text{Last}}$ in mA
Mehrfachzelle	( $R_{\text{ü}} = 220 \text{ m}\Omega$ )	3,72	3,40	560



## 2.4 Reihenschaltung von Spannungsquellen

## Auswertung

1. Berechnen Sie für alle Einzelzellen, sowie für die Mehrfachzelle den Innenwiderstand  $R_i$ . Berechnen Sie anschließend die Summe der Innenwiderstände der Einzelzelle und vergleichen Sie diese mit dem Innenwiderstand der Mehrfachzelle. Der Innenwiderstand der Zellen wird mithilfe folgender Formel berechnet:

$$R_i = \frac{U_0 - U_{\text{Last}}}{I_{\text{Last}}} - R_{\ddot{u}}$$

**Hinweis:** Trotz aufwendiger Vierpunktmessung müssen für die Innenwiderstandbestimmung noch die Kontaktwiderstände  $R_{\ddot{u}}$  von dem errechneten Wert abgezogen werden. Die Kontaktwiderstände sind in der Tabelle (siehe Messwerte) mit angegeben.

2. Erläutern Sie, weshalb es besser ist, eine einzelne Zelle mit der gleichen Zellspannung einer Mehrfachzelle zu wählen, als eine vergleichbare Zelle mit mehreren Zellen in Reihe? Erklären Sie die unterschiedlichen Widerstandswerte.

1.

1.Zelle:	$R_i = \frac{1,24\text{V} - 1,21\text{V}}{0,21\text{A}} - 0,05\Omega = \underline{\underline{92,9\text{m}\Omega}}$
2.Zelle:	$R_i = \frac{1,24\text{V} - 1,21\text{V}}{0,21\text{A}} - 0,05\Omega = \underline{\underline{92,9\text{m}\Omega}}$
3.Zelle:	$R_i = \frac{1,24\text{V} - 1,21\text{V}}{0,21\text{A}} - 0,05\Omega = \underline{\underline{92,9\text{m}\Omega}}$
Summe Einzelzellen:	$R_i = 3 \cdot 92,9\text{m}\Omega = \underline{\underline{278,7\text{m}\Omega}}$
Mehrfachzelle:	$R_i = \frac{3,72\text{V} - 3,40\text{V}}{0,56\text{A}} - 0,220\Omega = \underline{\underline{351,4\text{m}\Omega}}$

2.

Der Innenwiderstand bei dem Mehrfachmodul fällt höher aus als die Summe der Innenwiderstände aller drei Zellen, weil die Übergangswiderstände der Bauteile den Wert negativ beeinflussen. Es ist von Vorteil, den Zelltypen der Einzelzelle zu wählen aufgrund des bauartbedingten geringeren Innenwiderstands.

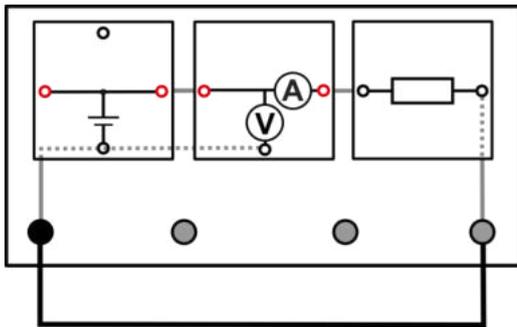
Sobald man mehrere Zellen hintereinander zu einer zusammen schaltet, verschlechtert sich der gesamte Innenwiderstand.

## 2.5 Die Speicherkapazität eines Akku-Moduls

### Aufgabe

Ermitteln Sie die Speicherkapazität einer Akkuzelle.

### Aufbau



### Benötigte Geräte

- Grundeinheit
- 1 LiFePo-Modul
- 1 Widerstandsmodul, dreifach
- 2 Widerstandssteckelemente (2x10Ω)
- 1 AV-Modul
- 1 Laborkabel

*Zusätzlich benötigt (optional):*  
- PC mit Datenauswerte-Software

### Durchführung

1. Bauen Sie den Versuch entsprechend dem Schaltplan auf. Schalten Sie die Widerstandssteckelemente parallel, um einen Lastwiderstand von 5Ω zu erreichen. Stecken Sie das Widerstandsmodul noch nicht auf.
2. Messen Sie zunächst die Leerlaufspannung der Spannungsquelle  $U_0(1)$  ohne den Widerstand und tragen Sie Ihre Messwerte in die Tabelle ein.
3. Stecken Sie das Widerstandsmodul auf und messen Sie anschließend 15min lang die Spannung  $U_{Last}$  und den Strom  $I_{Last}$  im Abstand von 1min. Das AV-Modul wird Strom-Spannungs-Modus betrieben.
4. Messen Sie fünf Minuten nach Beendigung des Versuchs die Leerlaufspannung  $U_0(2)$  des Akku-Moduls.

**Hinweis:** Das Akkumodul sollte vor dem Versuch eine Restkapazität von mindestens 50% aufweisen (entspricht  $U_0=3,3V$ ). Der Versuch muss abgebrochen werden sobald der Entladestrom deutlich stark abnimmt!

### Messwerte

$$U_0(1) = 3,34V$$

t in min	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
$U_{Last}$ in V	3,09	3,03	3,02	3,01	3,00	3,00	2,99	2,97	2,96	2,94	2,91	2,89	2,86	2,82	2,78	2,74
$I_{Last}$ in mA	535	522	520	519	518	517	515	511	509	505	501	497	492	486	479	470

$$U_0(2) = 3,23V$$



## 2.5 Die Speicherkapazität eines Akku-Moduls

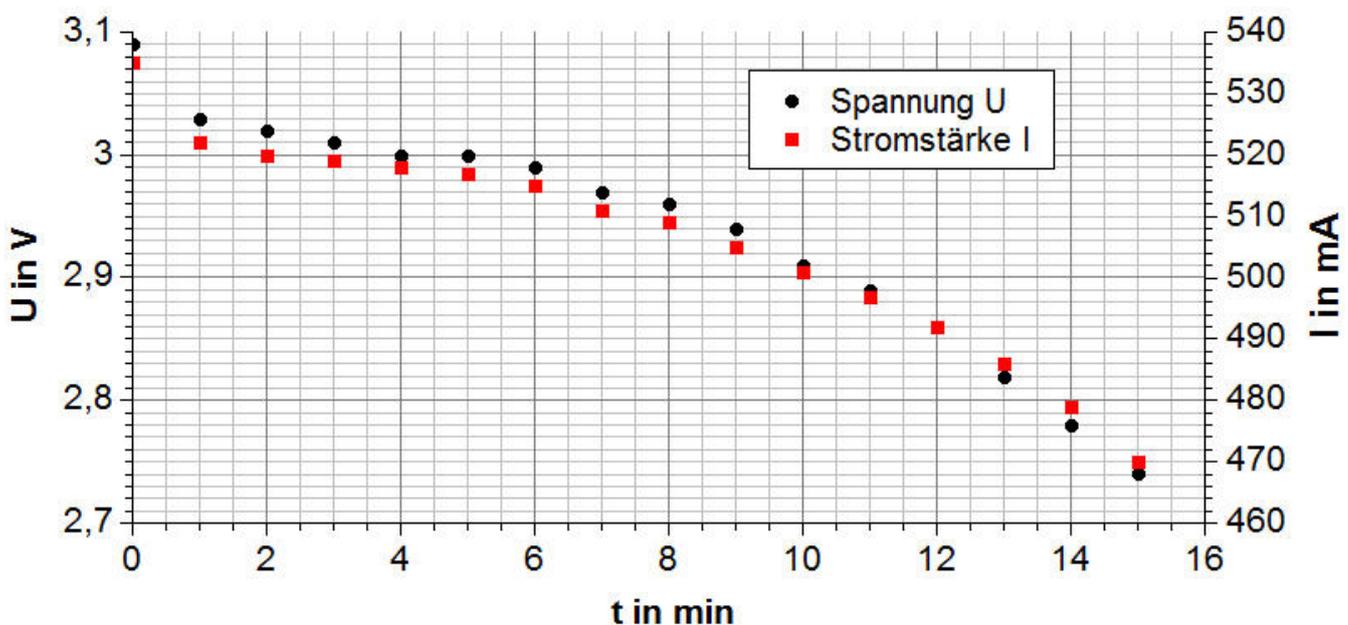
## Auswertung

1. Tragen Sie ihre Messwerte in das vorgegebene Diagramm ein.
2. Bestimmen Sie den Ladezustand und die Kapazität des Akku-Moduls am Anfang und am Ende des Experiments. Nutzen Sie dazu das Diagramm und die Tabelle aus dem Versuch „Die Nennspannung und Kapazität von Spannungsquellen“. Ermitteln Sie daraus den Kapazitätsverlust des Akku-Moduls während des Experiments.
3. Erläutern Sie, weshalb es in bestimmten Bereichen der Entladekurve zu Problemen bei der Ladestandsanzeige in LiFePo-Batteriesystemen kommen kann.
4. Übertragen Sie die experimentell ermittelten Werte in eine Datenauswerte-Software (z.Bsp Excel, Origin, QTI-Plot). Ermitteln Sie mithilfe der Software eine Polynomkurve, die den Verlauf der I-t-Kurve annähernd beschreibt. Bestimmen Sie anschließend die während des Versuchs abgegebene Ladung aus dem Integral über die I-t-Kurve:

$$Q = \int_{t_1}^{t_2} I dt$$

5. Vergleichen Sie die ermittelte Ladung Q mit dem in 1. ermittelten Kapazitätsverlust.

## Diagramm





## 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:

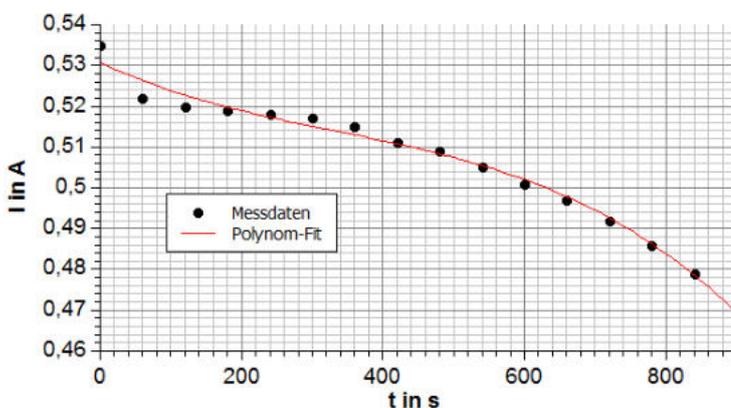
$$\frac{x}{200mAh} = \frac{15}{100} \rightarrow x = 30mAh$$

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.:

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

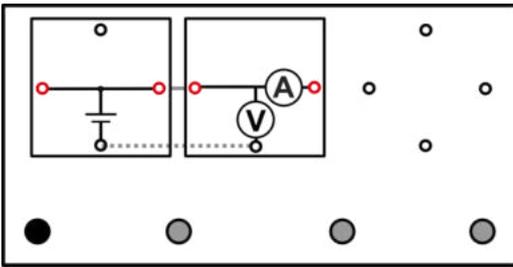
Der tatsächliche Kapazitätsverlust beim Entladen, ermittelt durch das Integral, liegt etwas höher als bei der ungenaueren Messung über die Leerlaufspannung (siehe 3. → Ladezustandsbestimmung!).

## 2.6 Der Energiegehalt verschiedener Akkumodule

### Aufgabe

Bestimmen Sie den Energiegehalt verschiedener Akkumodule.

### Aufbau



### Benötigte Geräte

- 1 Grundeinheit
- 1 AV-Modul
- Alle Akkumodule

### Durchführung

1. Bauen Sie den Versuch entsprechend dem Schaltplan auf.
2. Messen Sie jeweils die Leerlaufspannung der Spannungsquellen  $U_0$  und tragen Sie Ihre Messwerte in die Tabelle ein. Verwenden Sie das AV-Modul im Spannungsmodus.

### Auswertung

1. Nutzen Sie die untenstehende Abbildung (Diagramm 2.6), um den Ladezustand der Spannungsquellen zu bestimmen und tragen Sie in die Tabelle den prozentualen Wert ein.
2. Berechnen Sie die Restkapazität  $Q_R$  mit Hilfe der Ladezustandsbestimmung und der angegebenen maximalen Kapazität  $Q_{\max}$ . Tragen Sie diesen Wert ebenfalls in die Tabelle ein. Die Größen stehen dabei in folgendem Verhältnis:

$$\frac{\text{Restkapazität } Q_R}{\text{Maximalkapazität } Q_{\max}} = \frac{\text{Ladezustand in \%}}{100}$$

3. Berechnen Sie den Energieinhalt der verschiedenen Akkumodule und tragen Sie diesen in die Tabelle ein. Der Energiegehalt kann über folgende Formel berechnet werden (Einheiten beachten!):

$$E = U \cdot I \cdot t = U_0 \cdot Q_R$$

4. Berechnen Sie mithilfe des in Tabelle 2.6 angegebenen Gewichts der Akkus die massenbezogene Energiedichte  $\omega$  in kJ/kg.
5. Erklären Sie, weshalb in verschiedenen Anwendungen häufig Akkus mit relativ geringer (massenbezogener) Energiedichte wie der Blei-Akku trotz ihres hohen Gewichts bevorzugt werden.

## 2.6 Der Energiegehalt verschiedener Akkumodule

### Messwerte

Akku-Modul	$U_0$ in V	Zustand in %	$Q_R$ in mAh	E in kJ
NiMH	1,25	71	426	1,92
NiZn	1,70	80	440	2,69
LiFePo	3,30	50	100	1,19
Pb	1,99	36	900	6,45
LiPo	3,52	43	421	5,33

### Auswertung

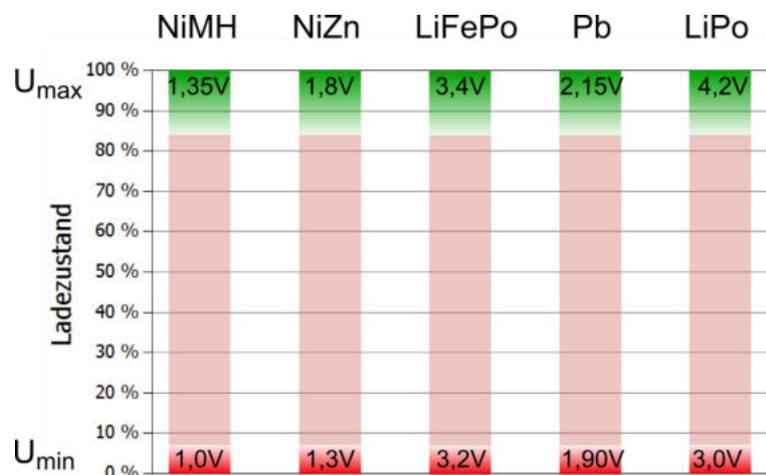


Diagramm 2.6: Ladezustandsbestimmung von Akkumodulen

Zellentyp	Kapazität $Q_{\max}$	Masse m in g
NiMH-Akku	600mAh	11,3
NiZn-Akku	550mAh	11,2
LiFePo-Akku	200mAh	7,8
Blei-Akku	2500mAh	177,4
LiPo-Akkumodul	980mAh	20,0

Tabelle 2.6: Maximale Kapazität und Gewicht der Akku-Module



## 2.6 Der Energiegehalt verschiedener Akkumodule

## Auswertung

2.

NiMH:	$\frac{x}{600mAh} = \frac{71}{100} \rightarrow x = 426mAh$
NiZn:	$\frac{x}{550mAh} = \frac{80}{100} \rightarrow x = 440mAh$
LiFePo:	$\frac{x}{200mAh} = \frac{50}{100} \rightarrow x = 100mAh$
Pb:	$\frac{x}{2500mAh} = \frac{36}{100} \rightarrow x = 900mAh$
LiPo:	$\frac{x}{980mAh} = \frac{43}{100} \rightarrow x = 421mAh$

3.

NiMH:	$E = U \cdot I \cdot t = U_0 \cdot Q_R = 1,25V \cdot 426mAh = 1,25V \cdot 0,426A \cdot 3600s = 1,92kJ$
NiZn:	$E = U \cdot I \cdot t = U_0 \cdot Q_R = 1,7V \cdot 440mAh = 1,7V \cdot 0,44A \cdot 3600s = 2,69kJ$
LiFePo:	$E = U \cdot I \cdot t = U_0 \cdot Q_R = 3,3V \cdot 100mAh = 3,3V \cdot 0,1A \cdot 3600s = 1,19kJ$
Pb:	$E = U \cdot I \cdot t = U_0 \cdot Q_R = 1,99V \cdot 900mAh = 1,99V \cdot 0,9A \cdot 3600s = 6,45kJ$
LiPo:	$E = U \cdot I \cdot t = U_0 \cdot Q_R = 3,52V \cdot 421mAh = 3,52V \cdot 0,421A \cdot 3600s = 5,33kJ$



## 2.6 Der Energiegehalt verschiedener Akkumodule

## Auswertung

3.

NiMH:

$$\omega = \frac{E}{m} = \frac{1,92kJ}{0,0113kg} = 169,9kJ/kg$$

NiZn:

$$\omega = \frac{E}{m} = \frac{2,69kJ}{0,0112kg} = 240,2kJ/kg$$

LiFePo:

$$\omega = \frac{E}{m} = \frac{1,19kJ}{0,0078kg} = 152,6kJ/kg$$

Pb:

$$\omega = \frac{E}{m} = \frac{6,45kJ}{0,1774kg} = 36,6kJ/kg$$

LiPo:

$$\omega = \frac{E}{m} = \frac{5,33kJ}{0,02kg} = 266,5kJ/kg$$

5.

Akkus mit höherer Energiedichte sind oft überproportional teurer oder weisen andere nachteilige

Eigenschaften wie eine geringe Lebensdauer auf. In Anwendungen, wo das Gewicht der Akkus eine

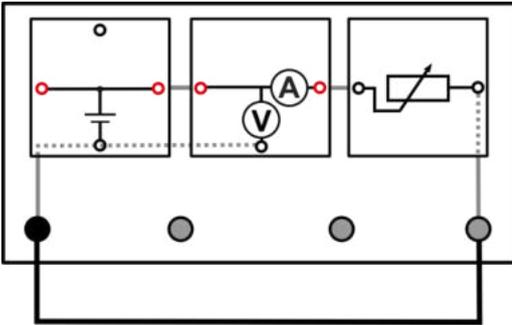
untergeordnete Rolle spielt, werden daher günstige Akkus wie der Blei-Akku bevorzugt.

## 2.7 Der $R_i$ -Wirkungsgrad eines Akkumoduls

### Aufgabe

Ermitteln Sie den  $R_i$ -Wirkungsgrad eines Akkumoduls.

### Aufbau



### Benötigte Geräte

- Grundeinheit
- 1 beliebiges Akkumodul
- 1 Potentiometer
- 1 AV-Modul
- 1 Laborkabel

### Durchführung

1. Bauen Sie den Versuch entsprechend dem Schaltplan auf.
2. Stecken Sie das Kabel noch nicht ein und messen Sie zunächst die Leerlaufspannung des Akku-Moduls  $U_0$  und tragen Sie Ihren Messwert in die Tabelle ein.
3. Stecken Sie anschließend das Kabel ein und messen Sie die Spannung  $U_{\text{Last}}$  und den Strom  $I_{\text{Last}}$  bei verschiedenen Widerständen am Potentiometer. Das AV-Modul wird im Strom-Spannungs-Modus betrieben. Tragen Sie ihre Messwerte in die Tabelle ein.

**Hinweis:** Unterbrechen Sie den Stromfluss (zum Beispiel durch Entfernen des Kabels) nach jeder Einzelmessung, um eine zu starke Entladung des Moduls während des Experiments zu vermeiden

### Auswertung

1. Ermitteln Sie für jeden Messpunkt den  $R_i$ -Wirkungsgrad  $\eta$  des Akkumoduls und tragen Sie den Wert in die Tabelle ein. Der  $R_i$ -Wirkungsgrad  $\eta$  wird mithilfe folgender Formel berechnet:

$$\eta = \frac{P_{\text{Last}}}{P_0} = \frac{U_{\text{Last}} \cdot I_{\text{Last}}}{U_0 \cdot I_{\text{Last}}}$$

2. Tragen Sie Ihre Messwerte in das Diagramm ein.
3. Beschreiben und erklären Sie das Verhalten des  $R_i$ -Wirkungsgrads in Abhängigkeit vom Laststrom.

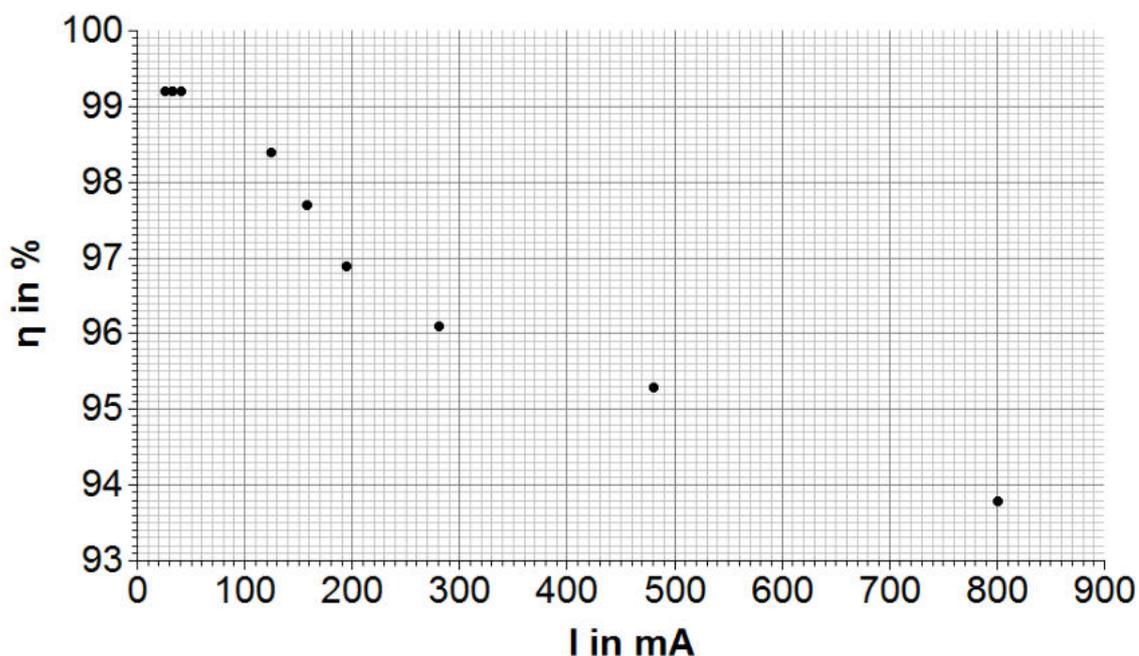
2.7 Der  $R_i$ -Wirkungsgrad eines Akkumoduls

## Messwerte

 $U_0 = 1,28\text{V}$  ( Messung mit einfachem NiMH-Akkumodul)

$R_{\text{Pot}}$ in $\Omega$	40	30	20	10	8	6	4	2	1
$U_{\text{Last}}$ in V	1,27	1,27	1,27	1,26	1,25	1,24	1,23	1,22	1,20
$I_{\text{Last}}$ in mA	25,5	31,9	40,1	124	157	194	280	480	800
$\eta$ in %	99,2	99,2	99,2	98,4	97,7	96,9	96,1	95,3	93,8

## Diagramm



## Auswertung

1.

$$\eta_{40\Omega} = \frac{P_{\text{Last}}}{P_0} = \frac{U_{\text{Last}} \cdot I_{\text{Last}}}{U_0 \cdot I_{\text{Last}}} = \frac{1,27\text{V} \cdot 25,5\text{mA}}{1,28 \cdot 25,5\text{mA}} = 0,992 \quad \rightarrow \text{Analog } \eta_{30\Omega} \text{ und } \eta_{20\Omega}$$

$$\eta_{10\Omega} = \frac{P_{\text{Last}}}{P_0} = \frac{U_{\text{Last}} \cdot I_{\text{Last}}}{U_0 \cdot I_{\text{Last}}} = \frac{1,26\text{V} \cdot 124\text{mA}}{1,28 \cdot 124\text{mA}} = 0,984$$

$\rightarrow$  Analoge Berechnung der übrigen Wirkungsgrade (Ergebnisse siehe Tabelle)!



## 2.7 Der $R_i$ -Wirkungsgrad eines Akkumoduls

### Auswertung

3.

Mit höheren Lastströmen (bei Verringerung des Lastwiderstandes am Potentiometer) sinkt der  $R_i$ -Wirkungsgrad. Dieses Verhalten liegt darin begründet, dass es bei höheren Lastströmen zu mehr Zusammenstößen zwischen den Leitungselektronen und den Metallatomen kommt. Daraufhin schwingen diese stärker, worauf noch mehr Elektronen mit ihnen zusammenstoßen. Der Widerstand und die thermischen Verluste steigen.

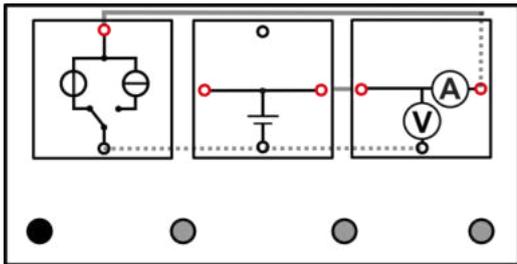
## 2.8 Der Gesamtwirkungsgrad einer Batterie

### Aufgabe

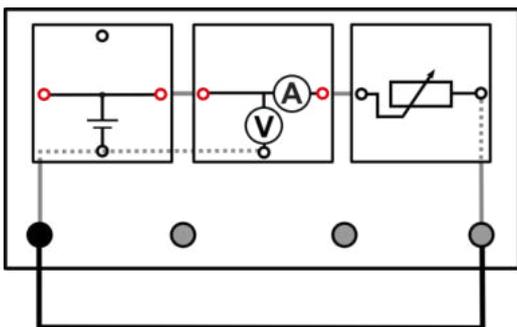
Ermitteln Sie den Gesamtwirkungsgrad einer Batterie.

### Aufbau

#### Teilversuch 1: Laden des Akkumoduls



#### Teilversuch 2: Entladen des Akkumoduls



### Benötigte Geräte

- Grundeinheit
- 1 Akkumodul NiMH, einfach
- 1 ChargerModul
- 1 Potentiometer
- 1 AV-Modul
- 1 Laborkabel

### Durchführung

#### Teilexperiment 1: Laden des Akkumoduls

1. Bauen Sie den Versuch entsprechend dem Schaltplan (Teilversuch 1) auf. Verwenden Sie das ChargerModul im NiMH-Modus (einfach). Hinweise zur Handhabung des ChargerModuls finden Sie auf Seite 42. Schalten Sie den Charger noch nicht ein.
2. Messen Sie zunächst die Leerlaufspannung des Akku-Moduls  $U_0(1)$  und notieren Sie den Wert.
3. Schalten Sie den Charger ein und messen Sie zehn Minuten lang in Abständen von einer Minute die Spannung  $U$  und den Strom  $I$ . Das AV-Modul wird im Strom-Spannungs-Modus betrieben. Tragen Sie ihre Messwerte in die Tabelle ein.
4. Messen Sie 5 Minuten nach Beendigung des ersten Teilexperiments erneut die Leerlaufspannung  $U_0(2)$ .

**Hinweis:** Das Akkumodul sollte zu Beginn des Experiments zu maximal 50% geladen sein (entspricht einer Leerlaufspannung von 1,18V). Gegebenenfalls muss das Akkumodul vor Beginn des Versuchs mithilfe der Widerstandsmodule entladen werden.



## 2.8 Der Gesamtwirkungsgrad einer Batterie

## Durchführung

**Teilexperiment 2:** Entladen des Akkumoduls

1. Bauen Sie den Versuch entsprechend dem Schaltplan (Teilversuch 2) auf. Stecken Sie das Potentiometer noch nicht ein, damit das Experiment nicht ohne Aufnahme der Messwerte startet.
2. Messen Sie zunächst die Leerlaufspannung des Akku-Moduls  $U_0(1)$  und notieren Sie den Wert.
3. Stecken Sie das Potentiometer ein und regeln den Entladestrom  $I$  auf den Wert des Ladestroms aus dem Teilversuch 1.
4. Messen Sie anschließend zehn Minuten lang in Abständen von einer Minute die Spannung  $U$  und den Strom  $I$ . Das AV-Modul wird im Strom-Spannungs-Modus betrieben. Regeln Sie gegebenenfalls den Widerstand am Potentiometer nach, um den Entladestrom konstant zu halten. Tragen Sie ihre Messwerte in die Tabelle ein.
5. Unterbrechen Sie nach zehn Minuten den Stromfluss durch Entfernen des Kabels. Messen Sie die Leerlaufspannung  $U_0(2)$  direkt nach Beendigung des Versuchs fünf Minuten lang in Abständen von einer Minute und tragen Sie Ihre Werte in die Tabelle ein.

## Messwerte

**Teilexperiment 1:** Laden des Akkumoduls

$$U_0(1) = 1,17V$$

t in min	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
U in V	1,22	1,25	1,27	1,28	1,29	1,30	1,31	1,32	1,33	1,34	1,35
I in mA	230	230	230	230	230	230	230	230	230	230	230
W in J	0,0	17,3	35,1	53,0	71,2	89,7	108,5	127,5	146,8	166,4	186,3

$$U_0(2) = 1,29V \text{ (nach fünf Minuten gemessen!)}$$

**Teilexperiment 2:** Entladen des Akkumoduls

$$U_0(1) = 1,29V$$

t in min	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
U in V	1,26	1,23	1,21	1,19	1,18	1,17	1,16	1,15	1,14	1,13	1,12
I in mA	230	230	230	230	230	230	230	230	230	230	230
W in J	0,0	17,0	33,4	49,3	65,1	80,7	96,0	111,1	125,9	140,3	154,6

Leerlaufspannung nach dem Experiment:

t in min	0	1	2	3	4	5
$U_0(2)$ in V	1,15	1,17	1,18	1,18	1,19	1,19



## 2.8 Der Gesamtwirkungsgrad einer Batterie

## Auswertung

1. Berechnen Sie für jeden Zeitpunkt die Energie  $W$ , welche für das Laden und Entladen der Batterie aufgewendet, beziehungsweise verbraucht wird und tragen Sie ihre Werte in die Tabelle ein (Einheiten beachten!).

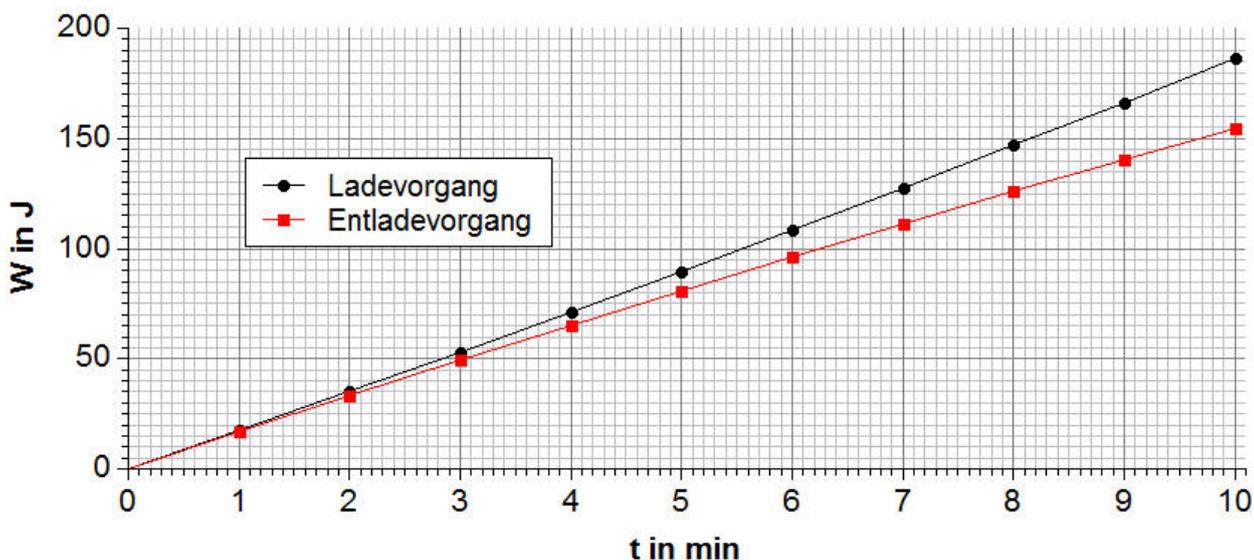
$$W = U \cdot I \cdot t$$

2. Tragen Sie ihre Werte in das Diagramm ein.
3. Bestimmen Sie die elektrische Energie  $W_1$ , die während des ersten Teilversuchs für das Laden der Batterie benötigt wurde ( $t=10\text{min}$ ). Bestimmen Sie außerdem die elektrische Energie  $W_2$ , die während des zweiten Teilversuchs von der Batterie abgegeben wurde ( $t=10\text{min}$ ). Berechnen Sie den Gesamtwirkungsgrad der Batterie.

$$\eta = \frac{W_2}{W_1}$$

4. Erklären Sie, wodurch der Wirkungsgrad von Akku-Modulen hauptsächlich beeinflusst wird.
5. Beschreiben und erklären Sie den sogenannten *Peukert-Effekt*.

## Diagramme



## Auswertung

- 1.

$$W_1(1\text{min}) = U \cdot I \cdot t = 1,25\text{V} \cdot 0,23\text{A} \cdot 1 \cdot 60\text{s} = 17,3\text{J}$$

$$W_1(2\text{min}) = U \cdot I \cdot t = 1,27\text{V} \cdot 0,23\text{A} \cdot 2 \cdot 60\text{s} = 35,1\text{J}$$

→ restliche Werte analog berechnen (Ergebnisse siehe Tabelle).



## 2.8 Der Gesamtwirkungsgrad einer Batterie

## Auswertung

3.

$$\eta = \frac{W_2}{W_1} = \frac{154,6J}{186,3J} = 0,83 \triangleq \underline{\underline{83\%}}$$

4.

Die größten Verluste beim Laden und Entladen von Akkumodulen werden durch den Innenwiderstand der Zellen verursacht. Durch den Lade-/Entladeprozess wird an diesem inneren Widerstand Wärme freigesetzt, wodurch ein Teil der Energie verloren geht. Das Verhältnis zwischen der beim Entladen entnehmbaren Energie und der Energie, welche beim Laden aufgewendet wird, bezeichnet man als Ladewirkungsgrad.

5.

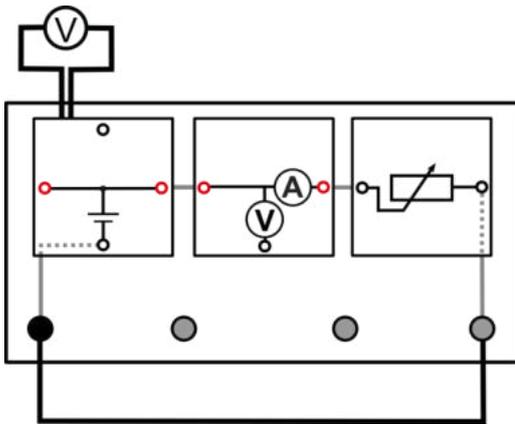
Das Absinken des Ladewirkungsgrads durch Schnellladung/-entladung bei hohen Strömen wird als Peukert-Effekt bezeichnet. Hervorgerufen wird dieser Effekt durch die Zunahme der Verluste am Innenwiderstand bei hohen Strömen (siehe Versuch „Der Ri-Wirkungsgrad eines Akkumoduls“).

## 2.9 Temperaturverhalten der Lithium-Polymerzelle

### Aufgabe

Ermitteln Sie das Temperaturverhalten der Lithium-Polymerzelle

### Aufbau



### Benötigte Geräte

- 1 Grundeinheit
- 1 LiPo-Akkumodul
- 1 Potentiometermodul
- 1 AV-Modul
- 1 Laborkabel

*Zusätzlich benötigt:*

- 1 Akku-Adapterkabel
- 1 Spannungsmessgerät

### Durchführung

1. Bauen Sie den Versuch entsprechend dem Schaltplan auf. Das AV-Modul auf der Grundeinheit wird im Stromstärke-Modus betrieben.

**Hinweis:** Zur Bestimmung des NTC-Widerstandwertes  $R_{NTC}$  werden das schwarze und das weiße Kabel des Akku-Adapterkabels und ein Spannungsmessgerät verwendet. Der schwarze Plug des Adapterkabels wird in die kleine Buchse an der Seite (oben links) des LiPo-Akkus eingesteckt.

2. Stellen Sie am Potentiometer zunächst einen Widerstand  $R_{Last}$  von  $5\Omega$  ein. Messen Sie zehn Minuten lang in Abständen von einer Minute die Stromstärke und den NTC-Widerstandswert  $R_{NTC}$  und tragen Sie Ihre Messwerte in die Tabelle ein.
3. Wiederholen Sie den Versuch für einen Widerstand am Potentiometer  $R_{Last}$  von  $3\Omega$ . Das LiPo-Modul sollte vor dem zweiten Telexperiment wieder auf den ursprünglichen Wert abkühlen.

**Hinweis:** Das LiPo-Akkumodul sollte vor dem Versuch eine Restspannung von mind. 3,5V aufweisen.

### Messwerte

1. Messreihe:  $R_{Last} = 5\Omega$

t in min	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
I in mA	600	600	600	600	600	600	600	600	600	600	600
$R_{NTC}$ in $k\Omega$	11,25	10,76	10,67	10,59	10,52	10,45	10,39	10,34	10,29	10,24	10,20
T in $^{\circ}C$	19	20,5	21	21	21	21,5	21,5	21,5	22	22	22
W in kJ	0,00	0,11	0,22	0,32	0,43	0,54	0,65	0,76	0,86	0,97	1,08



## 2.9 Temperaturverhalten der Lithium-Polymerzelle

## Messwerte

2. Messreihe:  $R_{Last} = 3\Omega$ 

t in min	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
I in mA	950	950	940	930	930	920	910	900	890	860	820
$R_{NTC}$ in $k\Omega$	11,25	10,37	10,13	9,95	9,80	9,67	9,55	9,38	9,28	9,20	9,15
T in $^{\circ}C$	19	21,5	22,5	22,5	23	23,5	24	24,5	24,5	25	25,5
W in kJ	0,00	0,16	0,32	0,47	0,62	0,76	0,89	1,02	1,14	1,20	1,21

## Auswertung

1. Ermitteln Sie die Temperatur für jeden Messpunkt anhand der abgebildeten Graphik (Abb.2.9) und tragen Sie diese in die Messwerttabelle ein.
2. Berechnen Sie jeweils die Energie, welche von den Lastwiderständen aufgenommen wird und tragen Sie Ihre Werte in die Tabelle ein. Die Energie berechnet sich folgendermaßen:

$$W = R_{Last} \cdot I^2 \cdot t$$

3. Tragen Sie ihre Werte in das Diagramm ein.
4. Beschreiben und erläutern Sie das Verhalten des W-t-Diagramms.

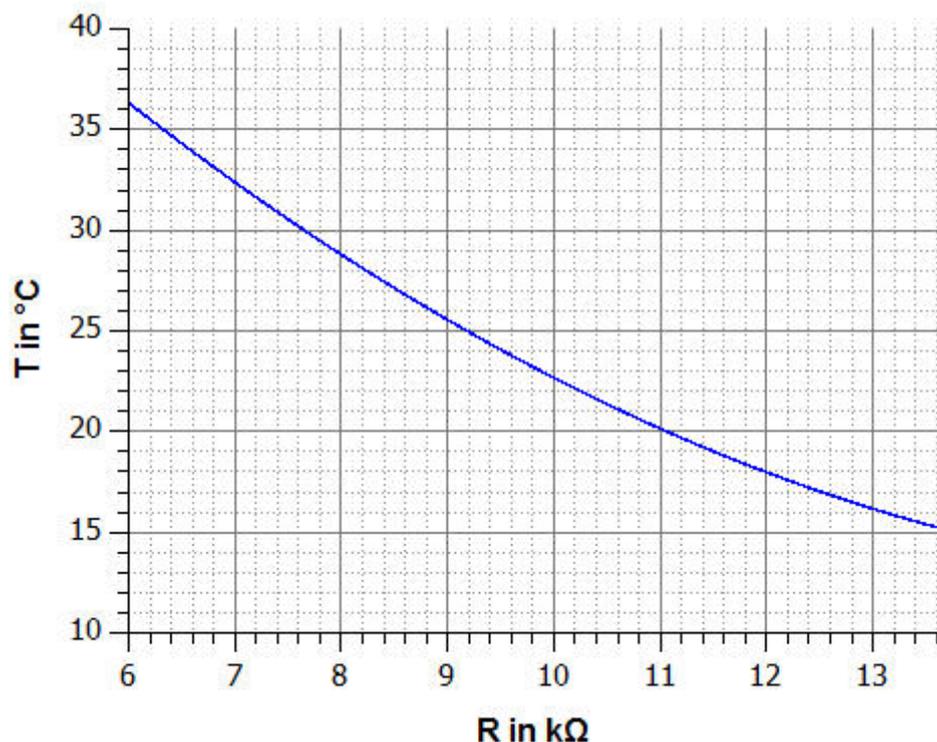
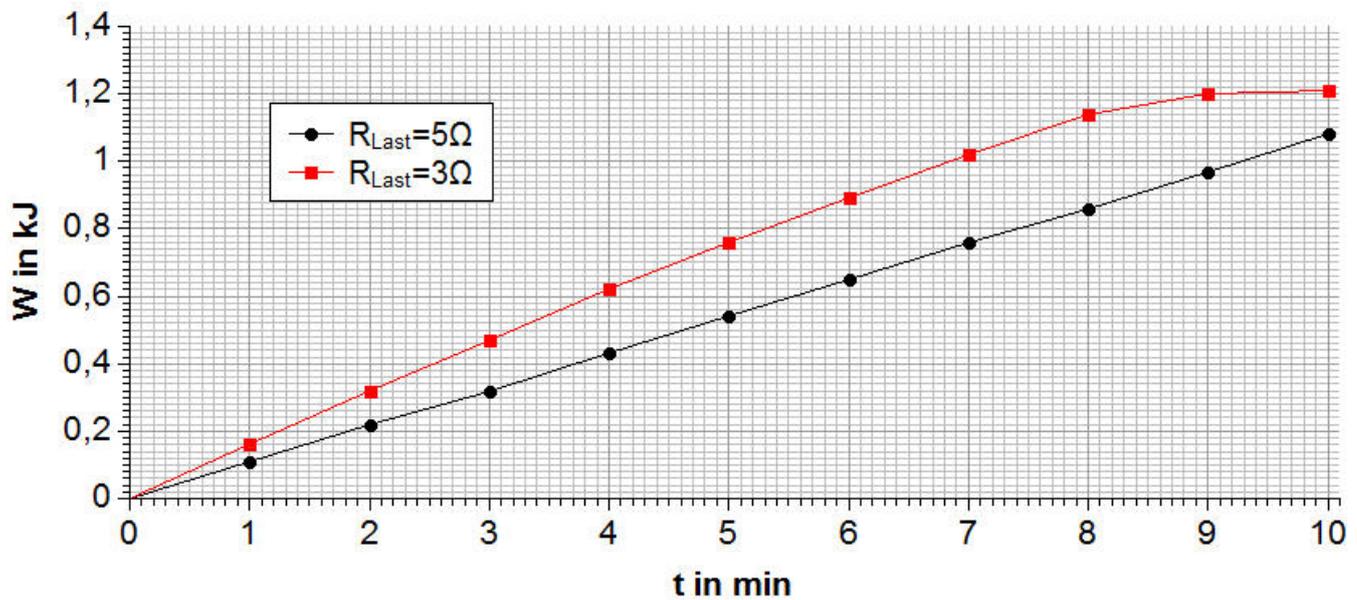


Abb.2.9: Temperatur in Abhängigkeit von NTC-Widerstandswert



## 2.9 Temperaturverhalten der Lithium-Polymerzelle

## Diagramme



## Auswertung

2.

$W_{5\Omega}(1\text{min}) = R_{Last} \cdot I^2 \cdot t = 5\Omega \cdot (0,6A)^2 \cdot 1 \cdot 60s = 108J = 0,11kJ$
$W_{5\Omega}(2\text{min}) = R_{Last} \cdot I^2 \cdot t = 5\Omega \cdot (0,6A)^2 \cdot 2 \cdot 60s = 216J = 0,22kJ$
→ Restliche Werte analog berechnen (Ergebnisse siehe Tabelle)

4.

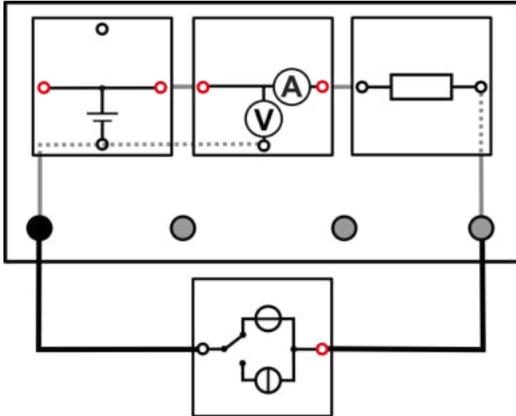
Mit steigender Temperatur steigt zunächst auch die Leistung des Lipo-Akkus an. Dies liegt darin begründet, dass mit steigender Temperatur die Ionenleitfähigkeit erhöht und der Innenwiderstand des Akkus verringert wird. Die an den Lastwiderstand abgegebene Energie steigt zunächst kontinuierlich an. Da bei dem kleineren Widerstand höhere Ströme fließen, wird mehr Energie vom Akku abgegeben. Zum Ende hin wird der Verlauf der (3 Ohm-) Kurve flacher, da die Stromstärke dann deutlich absinkt.

## 3.1 Das Ladeverhalten des Kondensators

### Aufgabe

Nehmen Sie die Ladekurve eines Kondensators auf.

### Aufbau



### Benötigte Geräte

- 1 Grundeinheit
- 1 ChargerModul
- 1 Kondensatormodul
- 1 AV-Modul
- 1 Widerstandsmodul, 3-fach
- 2 Widerstands-Steckelemente  
(2 x  $R=10\ \Omega$ )
- 2 Laborkabel

### Durchführung

#### Variante 1: Laden im Supercap-Modus

1. Bauen Sie den Versuch entsprechend dem Schaltplan auf. Verwenden Sie das ChargerModul im Kondensator-Modus („4,0V Supercap“).
2. Stecken Sie das Widerstandsmodul von  $R=10\ \Omega$  ein und messen Sie anschließend 90s lang (beziehungsweise bis zum Erreichen des Abbruchstroms) die Spannung  $U_{\text{Last}}$  und den Strom  $I_{\text{Last}}$  im Abstand von 10s. Das AV-Modul wird im Strom-Spannungs-Modus betrieben.
3. Tragen Sie alle Messwerte in die Tabelle ein.
4. Entladen Sie den Kondensator und wiederholen Sie den Versuch für den Widerstand von  $R=5\ \Omega$  (realisiert durch Parallelschaltung von  $2 \times 10\ \Omega$ ).

#### Variante 2: Laden im Festspannungs-Modus

1. Bauen Sie den Versuch entsprechend dem Schaltplan auf. Verwenden Sie das ChargerModul im Festspannungsmodus von 3V.
2. Nehmen Sie analog zur Variante 1 die Ladekurven des Kondensators für verschiedene Widerstände auf. Messen Sie in diesem Fall 120s lang im Abstand von 10s die Stromstärke und Spannung und tragen Sie Ihre Werte in die Tabelle ein.

**Hinweis:** Achten Sie 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. Tragen Sie Ihre Messwerte in die Diagramme ein.
2. Interpretieren Sie die Diagramme über das Ladeverhalten des Kondensators.
3. Ermitteln Sie die Zeit in der der Kondensator zu 60% aufgeladen ist (bezogen auf 3V Vollladung beim Festspannungsmodus).
4. Benennen Sie Anwendungsbereiche von sogenannten Supercaps.



## 3.1 Das Ladeverhalten des Kondensators

## Messwerte: Variante 1

 **$R_1 = 10\Omega$ :**

t in s	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
$U_{\text{Last}}$ in V	0,12	1,2	1,68	2,05	2,37	2,61	2,82	2,99	3,13	3,25
$I_{\text{Last}}$ in mA	340	250	203	178	148	128	108	93	79	69

 **$R_1 = 5\Omega$ :**

t in s	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
$U_{\text{Last}}$ in V	0,12	1,25	2,08	2,62	2,99	3,24	3,43	3,57	-	-
$I_{\text{Last}}$ in mA	600	450	313	224	167	128	96	75	-	-

## Messwerte: Variante 2

 **$R_1 = 10\Omega$ :**

t in s	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
$U_{\text{Last}}$ in V	0,07	0,66	1,11	1,47	1,73	1,94	2,11	2,25	2,37	2,46	2,54	2,61	2,66
$I_{\text{Last}}$ in mA	250	205	170	139	116	97	80	68	57	49	41	36	31

 **$R_1 = 5\Omega$ :**

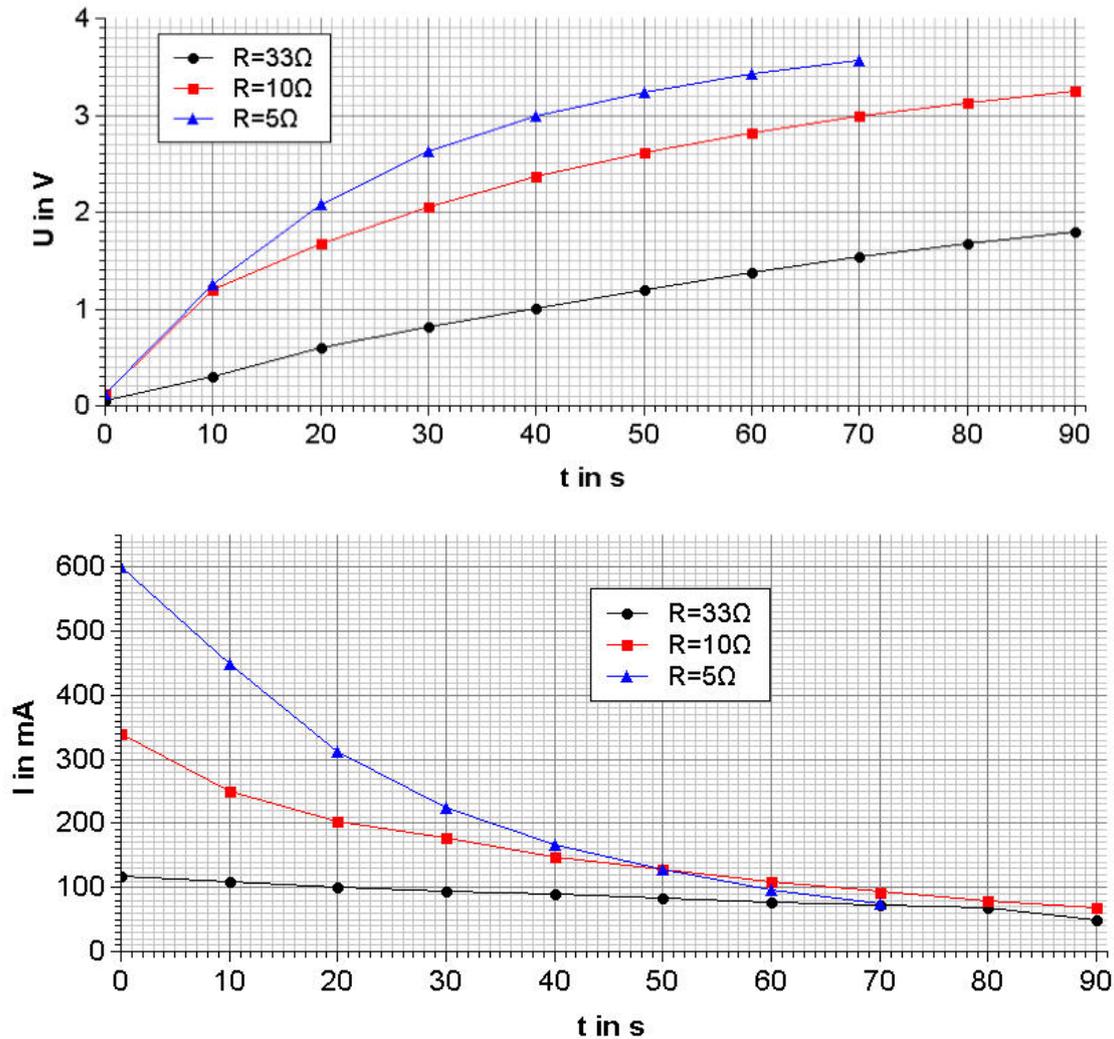
t in s	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
$U_{\text{Last}}$ in V	0,18	1,02	1,65	2,04	2,29	2,49	2,61	2,70	2,78	2,83	2,87	2,90	2,92
$I_{\text{Last}}$ in mA	450	317	213	156	115	84	62	47	37	28	22	17	14



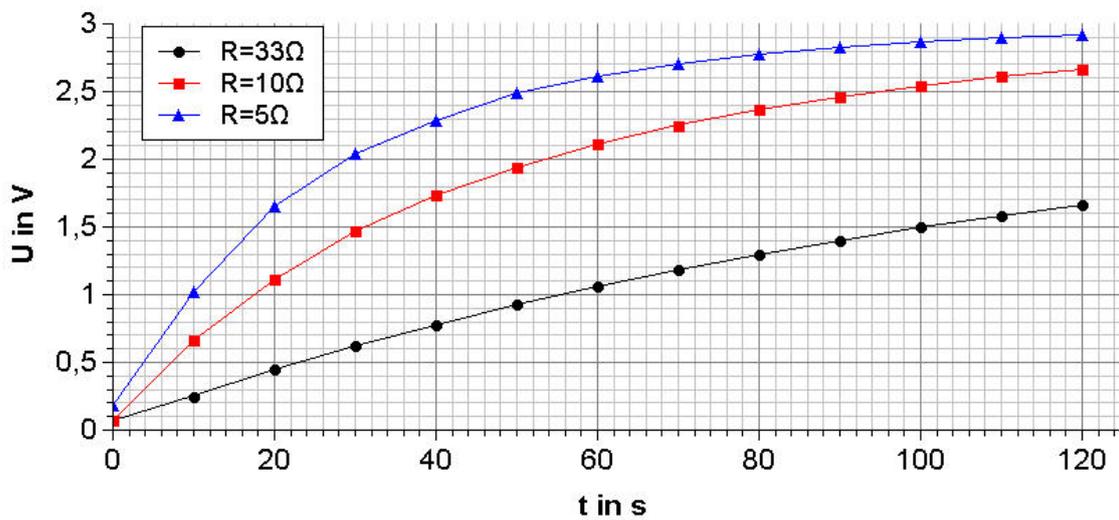
### 3.1 Das Ladeverhalten des Kondensators

#### Diagramme

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



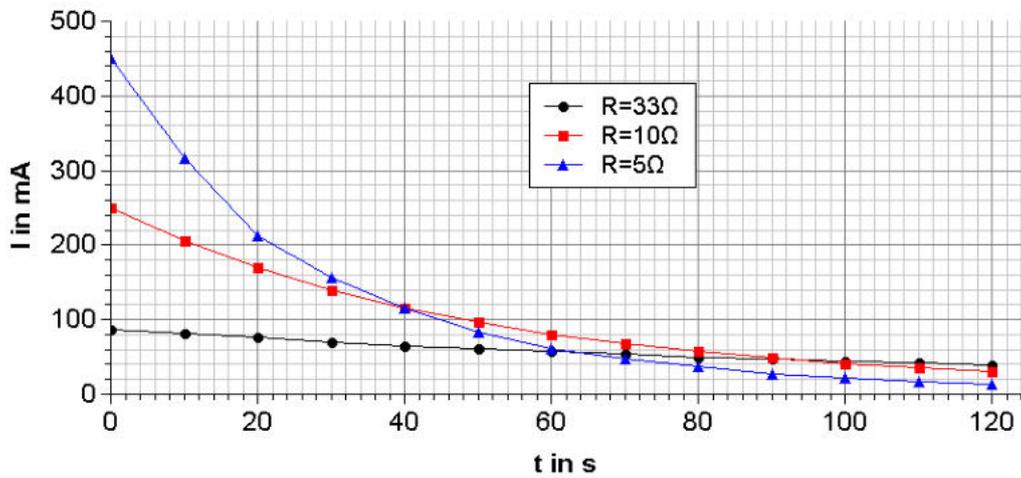
Variante 2: Laden im Festspannungs-Modus (zusätzlich  $R=33\Omega$  aufgetragen)





## 3.1 Das Ladeverhalten des Kondensators

## Diagramme



## 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.

3.

$R=10\ \Omega$ :  $t(60\%) = 42\text{s}$

$R=5\ \Omega$ :  $t(60\%) = 24\text{s}$

4.

- Stabilisation der Stromversorgung bei schwankender Belastung (z.Bsp. Laptop, Smartphone...)

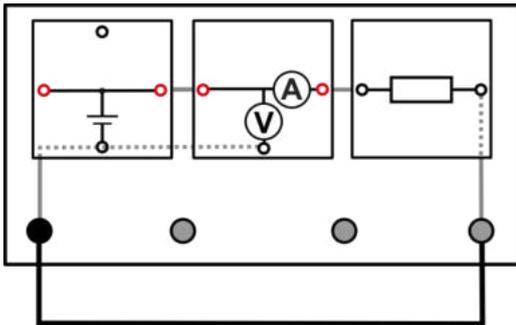
- Alle Anwendungen, in denen ihre schnelle Ladefähigkeit genutzt wird (z.Bps. Notfall-LED-Blitzlichttaschenlampe, netzunabhängige Lautsprecher)

## 3.2 Das Entladeverhalten des Kondensators

### Aufgabe

Nehmen Sie die Entladekurve des Kondensators auf.

### Aufbau



### Benötigte Geräte

- 1 Grundeinheit
- 1 AV-Modul
- 1 Widerstandsmodul 3-fach
- 2 Widerstands-Steckelemente  
(2 x  $R=10\Omega$ )
- 1 Kondensatormodul
- 1 Laborkabel

### Durchführung

1. Bauen Sie den Versuch entsprechend dem Schaltplan auf. Stecken Sie das Widerstandsmodul noch nicht ein.
2. Messen Sie die Leerlaufspannung  $U_0$  des Kondensators und notieren Sie den Wert.
3. Stecken Sie das Widerstandsmodul von  $R=10\Omega$  ein und messen Sie anschließend 90s lang die Spannung  $U_{\text{Last}}$  und den Strom  $I_{\text{Last}}$  im Abstand von 10s. Das AV-Modul wird im Strom-Spannungs-Modus betrieben.
4. Wiederholen Sie den Versuch für einen Widerstand von  $R=5\Omega$  (realisiert durch Parallelschaltung von  $2 \times 10\Omega$ ).

**Hinweis:** Der Kondensator sollte sich vor beiden Teilversuchen auf dem gleichen Ladezustand befinden. Laden Sie dazu den Kondensator nach dem ersten Teilversuch entsprechend wieder auf. Hinweise zum Ladeprozess finden Sie im Versuch „Das Ladeverhalten des Kondensators“.

### Auswertung

1. Tragen Sie Ihre Messwerte in die Diagramme ein.
2. Interpretieren Sie das Diagramm über das Entladeverhalten des Kondensators.
3. Ermitteln Sie die Zeit, in der der Kondensator auf 60% entladen ist (bezogen auf 3V Vollladung).
4. Berechnen Sie die Ladung des Kondensatormoduls zu Beginn und nach 90s Entladezeit für den Widerstand von  $R=10\Omega$  (Kapazität  $C=5,0F$ ).
5. Die Kapazität eines Kondensators ist mit „n47“ angegeben. Benennen Sie die Bedeutung dieser Angabe.



## 3.2 Das Entladeverhalten des Kondensators

## Messwerte

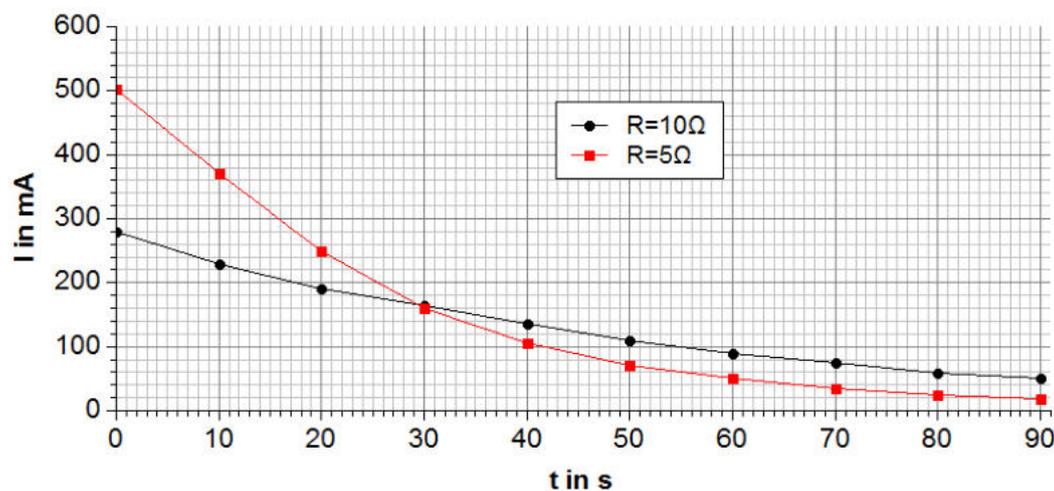
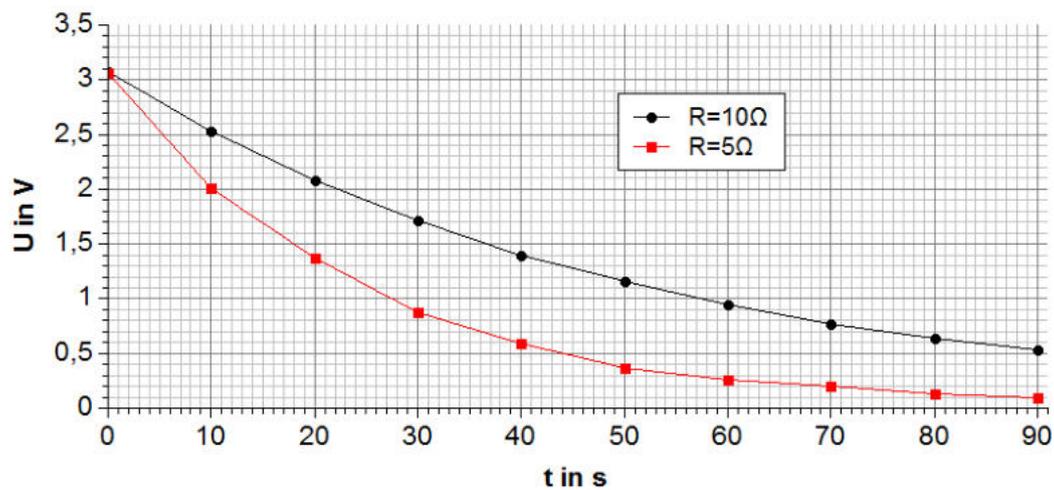
 $R_1 = 10\Omega$ :

t in s	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
U in V	3,07	2,53	2,08	1,72	1,40	1,16	0,95	0,77	0,64	0,53
I in mA	280	230	190	165	135	110	90	74	59	50

 $R_2 = 5\Omega$ :

t in s	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
U in V	3,06	2,01	1,37	0,88	0,59	0,37	0,26	0,20	0,13	0,1
I in mA	503	370	250	160	105	70	50	35	25	18

## Diagramme





## 3.2 Das Entladeverhalten des Kondensators

## Auswertung

2.

Spannung und Stromstärke sinken während des Entladeprozesses ab. Bei kleinerem Lastwiderstand fließen größere Entladeströme und der Kondensator entlädt sich schneller. Die Spannung nimmt in diesem Fall also deutlich schneller ab. Die Stromstärke sinkt ebenfalls deutlich schneller.

3.

$$R = 10\Omega: U_1 = 3,07V \rightarrow U_2(60\%) = 0,6 \cdot 3,07V = 1,84V \rightarrow \underline{\underline{t = 25s}}$$

4.

$$Q_1 = C \cdot U_1 = 5,0F \cdot 3,07V = \underline{\underline{15,35C}}$$

$$Q_2 = C \cdot U_2 = 5,0F \cdot 0,53V = \underline{\underline{2,65C}}$$

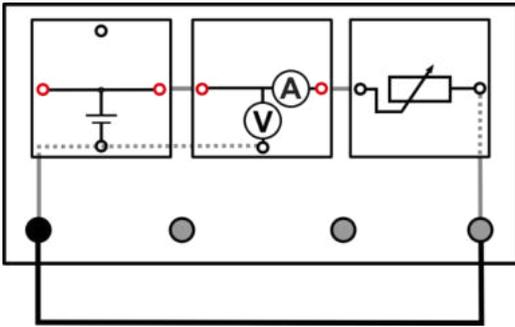
5. 470pF

## 4.1 U-I-Kennlinie des einfachen NiMH-Akkumoduls

### Aufgabe

Ermitteln Sie die U-I-Kennlinie des einfachen NiMH-Akkumoduls.

### Aufbau



### Benötigte Geräte

- 1 Grundeinheit
- 1 Akkumodul NiMH, einfach
- 1 Potentiometermodul
- 1 AV-Modul
- 1 Laborkabel

### Durchführung

1. Bauen Sie den Versuch entsprechend dem Schaltplan auf. Stecken Sie das Potentiometermodul noch nicht auf.
2. Messen Sie zunächst die Leerlaufspannung des Akku-Moduls  $U_0$  und tragen Sie Ihren Messwert in die Tabelle ein.
3. Stellen Sie am Potentiometer einen Widerstand  $R_{Pot}$  von  $50\Omega$  ein und stecken Sie das Modul auf die Grundeinheit. Messen Sie die Spannung  $U_{Last}$  und den Strom  $I_{Last}$  bei geschlossenem Stromkreis. Das AV-Modul wird im Strom-Spannungs-Modus betrieben. Tragen Sie ihre Messwerte in die Tabelle ein.
4. Verringern Sie in mehreren Schritten den Widerstand  $R_{Pot}$  am Potentiometer und bestimmen Sie für verschiedene Widerstände jeweils die Spannung  $U_{Last}$  und den Strom  $I_{Last}$ .

**Hinweis:** Unterbrechen Sie den Stromfluss (zum Beispiel durch Entfernen des Kabels) nach jeder Einzelmessung, um eine zu starke Entladung des Moduls während des Experiments zu vermeiden.

### Auswertung

1. Stellen Sie Ihre Messwerte in dem Diagramm dar.
2. Vergleichen Sie ihre gemessene Kennlinie mit den beigegefügt Kennlinien und treffen Sie eine Aussage zum Zustand der Zelle. Berechnen Sie die Restkapazität des Akku-Moduls. Hinweise zur Berechnung finden Sie im Versuch „Die Nennspannung und Kapazität von Spannungsquellen“.
3. Benennen Sie Anwendungen für NiMH-Akkus. Begründen Sie die Anwendung anhand ihrer Eigenschaften.
4. Erläutern Sie, weshalb NiMH-Akkus nicht in sicherheitsrelevanten Geräten wie Feuermeldern oder Notfall-taschenlampen verwendet werden sollten.
5. Benennen Sie Vorteile von NiMH-Akkus gegenüber NiCd-Akkus.



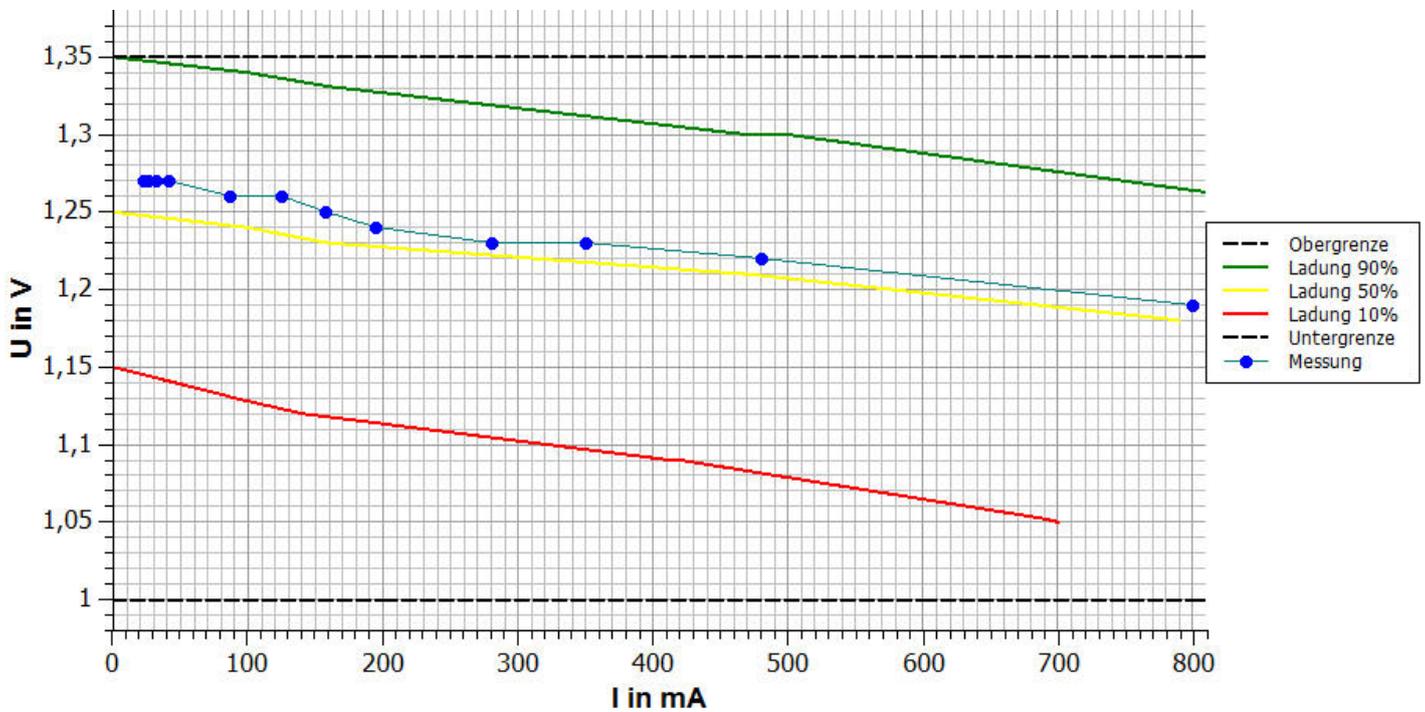
### 4.1 U-I-Kennlinie des einfachen NiMH-Akkumoduls

#### Messwerte

$U_0 = 1,27V$

R <sub>Pot</sub> in Ω	50	40	30	20	15	10	8	6	4	3	2	1
U <sub>Last</sub> in V	1,27	1,27	1,27	1,27	1,26	1,26	1,25	1,24	1,23	1,23	1,22	1,19
I <sub>Last</sub> in mA	21,7	25,5	31,9	40,1	85,8	124	157	194	280	350	480	800

#### Diagramme



#### Auswertung

2.

Ladezustand: etwa 60%

Restkapazität:

$$\frac{x}{600mAh} = \frac{60}{100} \rightarrow x = \underline{\underline{360mAh}}$$



## 4.1 U-I-Kennlinie des einfachen NiMH-Akkumoduls

## Auswertung

3.

NiMH-Akkus werden aufgrund ihrer relativ günstigen Anschaffungskosten bei einer praktikablen Energiedichte und damit geringem Gewicht vor allem in Kleingeräten wie Spielzeugen, Fernsteuerungen, Audio-, Foto- und Videogeräten oder kleinen Elektrogeräten verwendet. Auch in Telefonen oder GPS-Geräten finden die NiMH-Akkus Anwendung.

4.

Handelsübliche NiMH-Akkus besitzen eine relativ hohe Selbstentladungsrate. Diese kann zu Beginn bei bis zu 10% pro Tag liegen und stabilisiert sich im Laufe der Zeit auf etwa 1% pro Tag. Sicherheitsrelevante Geräte benötigen allerdings eine hohe Akku-Lebensdauer von mehreren Monaten oder Jahren, was bei der Lagerung von NiMH-Akkus aufgrund der hohen Selbstentladung nicht gewährleistet werden kann.

5.

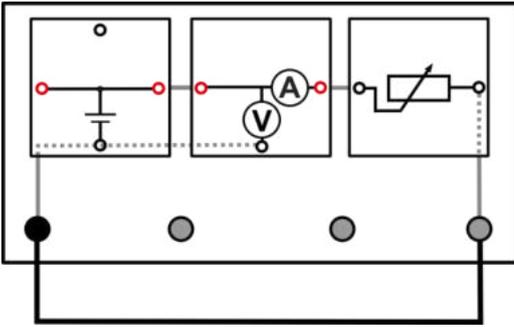
- NiMH-Akkus enthalten keine Schwermetalle und gelten deshalb als umweltfreundlich.
- Höhere Akku-Kapazität bei gleicher Baugröße aufgrund der Zell-Chemie
- Längere Laufzeiten (bis zu 40% mehr)
- Laden ohne Memory-Effekt möglich

## 4.2 U-I-Kennlinie des NiZn-Akkumoduls

### Aufgabe

Ermitteln Sie die U-I-Kennlinie des NiZn-Akkumoduls.

### Aufbau



### Benötigte Geräte

- 1 Grundeinheit
- 1 Akkumodul NiZn
- 1 Potentiometermodul
- 1 AV-Modul
- 1 Laborkabel

### Durchführung

1. Bauen Sie den Versuch entsprechend dem Schaltplan auf. Stecken Sie das Potentiometermodul noch nicht auf.
2. Messen Sie zunächst die Leerlaufspannung des Akku-Moduls  $U_0$  und tragen Sie Ihren Messwert in die Tabelle ein.
3. Stellen Sie am Potentiometer einen Widerstand  $R_{Pot}$  von  $60\Omega$  ein und stecken Sie das Modul auf die Grundeinheit. Messen Sie die Spannung  $U_{Last}$  und den Strom  $I_{Last}$  bei geschlossenem Stromkreis. Das AV-Modul wird im Strom-Spannungs-Modus betrieben. Tragen Sie ihre Messwerte in die Tabelle ein.
4. Verringern Sie in mehreren Schritten den Widerstand  $R_{Pot}$  am Potentiometer und bestimmen Sie für verschiedene Widerstände jeweils die Spannung  $U_{Last}$  und den Strom  $I_{Last}$ .

**Hinweis:** Unterbrechen Sie den Stromfluss (zum Beispiel durch Entfernen des Kabels) nach jeder Einzelmessung, um eine zu starke Entladung des Moduls während des Experiments zu vermeiden.

### Auswertung

1. Stellen Sie Ihre Messwerte in einem Diagramm dar.
2. Vergleichen Sie ihre gemessene Kennlinie mit den beigefügten Kennlinien und treffen Sie eine Aussage zum Zustand der Zelle. Berechnen Sie die Restkapazität des Akku-Moduls. Hinweise zur Berechnung finden Sie im Versuch „Die Nennspannung und Kapazität von Spannungsquellen“.
3. Erläutern Sie, weshalb der NiZn-Akku erst in der 2000er Jahren wirklich praktische Anwendung fand, obwohl Adison diesen Akku-Typen schon 1901 hat patentieren lassen?
4. Benennen Sie Vorteile von NiZn-Akkus gegenüber NiMH-Systemen, speziell in der Automobilbranche.



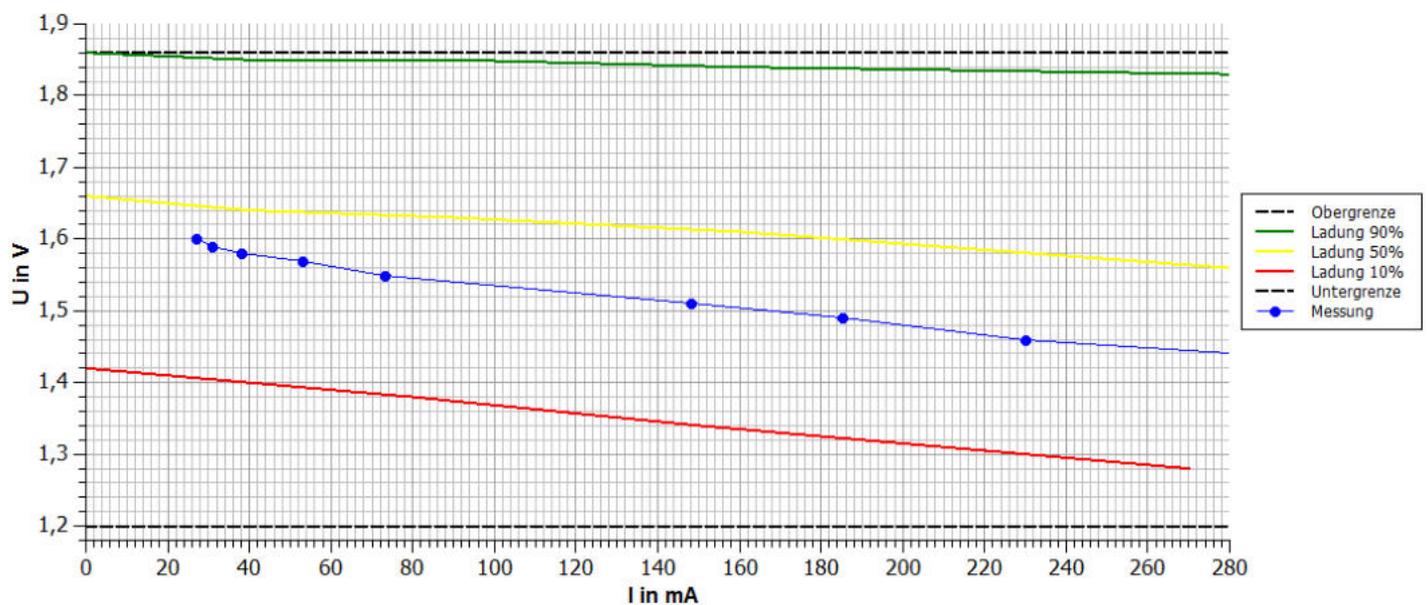
## 4.2 U-I-Kennlinie des NiZn-Akkumoduls

## Messwerte

$$U_0 = 1,65V$$

$R_{Pot}$ in $\Omega$	60	50	40	30	20	10	8	6	4
$U_{Last}$ in V	1,60	1,60	1,59	1,57	1,55	1,51	1,49	1,46	1,43
$I_{Last}$ in mA	27	31	38	53	73	148	185	230	310

## Diagramme



## Auswertung

2.

Der Ladezustand beträgt zu Beginn des Versuchs etwa 40%. Es wird deutlich, dass der Akku sich im Laufe des Experiments entlädt, sodass sich der Ladezustand am Ende des Experiments (wenn höhere Ströme gemessen werden) auf etwa 30% verringert. Dadurch verläuft die Kennlinie nicht parallel zu den vorgegebenen Kennlinien.

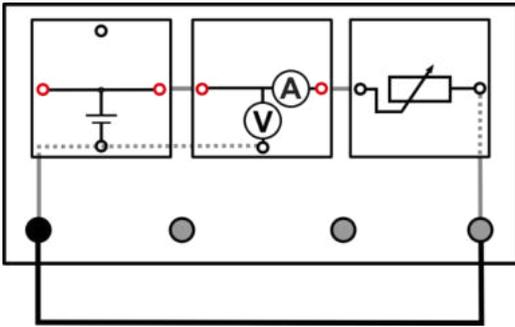


## 4.3 U-I-Kennlinie des LiFePo-Akkumoduls

### Aufgabe

Ermitteln Sie die U-I-Kennlinie des LiFePo-Akkumoduls.

### Aufbau



### Benötigte Geräte

- 1 Grundeinheit
- 1 Akkumodul LiFePo
- 1 Potentiometermodul
- 1 AV-Modul
- 1 Laborkabel

### Durchführung

1. Bauen Sie den Versuch entsprechend dem Schaltplan auf. Stecken Sie das Potentiometermodul noch nicht auf.
2. Messen Sie zunächst die Leerlaufspannung des Akku-Moduls  $U_0$  und tragen Sie Ihren Messwert in die Tabelle ein.
3. Stellen Sie am Potentiometer einen Widerstand  $R_{Pot}$  von  $100\Omega$  ein und stecken Sie das Modul auf die Grundeinheit. Messen Sie die Spannung  $U_{Last}$  und den Strom  $I_{Last}$  bei geschlossenem Stromkreis. Das AV-Modul wird im Strom-Spannungs-Modus betrieben. Tragen Sie ihre Messwerte in die Tabelle ein.
4. Verringern Sie in mehreren Schritten den Widerstand  $R_{Pot}$  am Potentiometer und bestimmen Sie für verschiedene Widerstände jeweils die Spannung  $U_{Last}$  und den Strom  $I_{Last}$ .

**Hinweis:** Unterbrechen Sie den Stromfluss (zum Beispiel durch Entfernen des Kabels) nach jeder Einzelmessung, um eine zu starke Entladung des Moduls während des Experiments zu vermeiden.

### Auswertung

1. Stellen Sie Ihre Messwerte in einem Diagramm dar.
2. Vergleichen Sie ihre gemessene Kennlinie mit den beigefügten Kennlinien und treffen Sie eine Aussage zum Zustand der Zelle. Berechnen Sie die Restkapazität des Akku-Moduls. Hinweise zur Berechnung finden Sie im Versuch „Die Nennspannung und Kapazität von Spannungsquellen“.
3. Benennen Sie Vor- und Nachteile von Lithium-Eisenphosphat-Akkumulatoren gegenüber anderen Akku-Typen!
4. Benennen Sie die wichtigsten Anwendungsbereiche von LiFePo-Akkumulatoren.



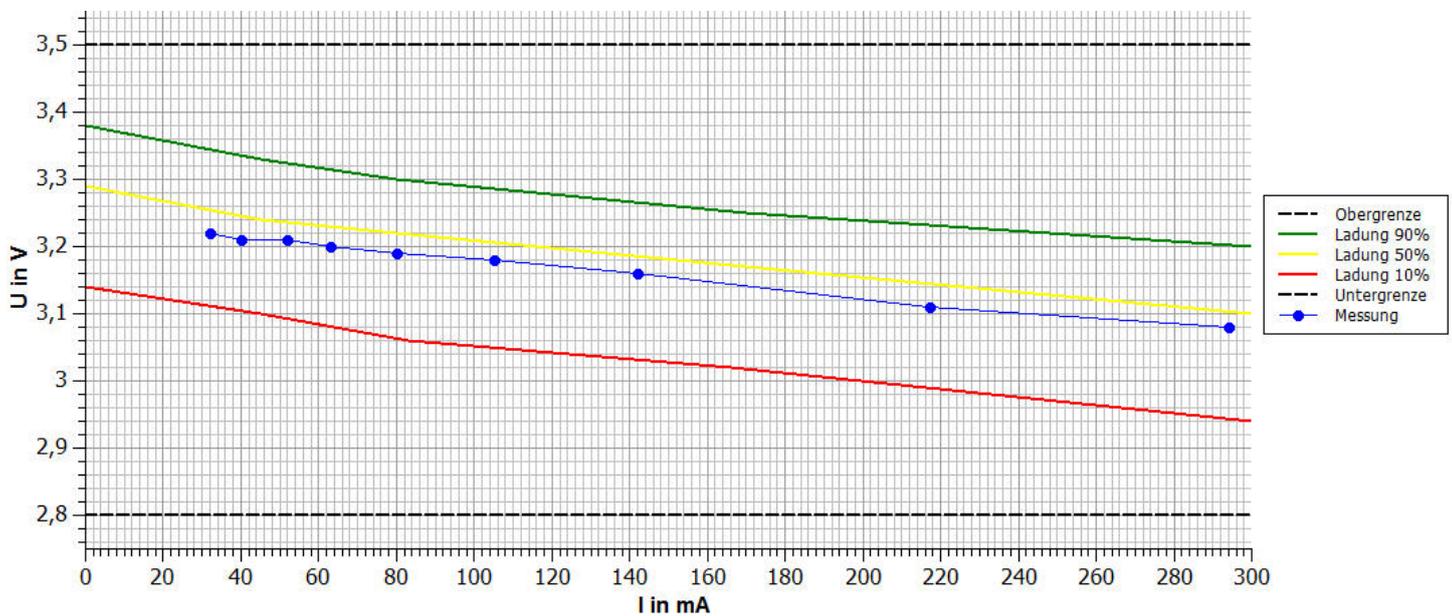
### 4.3 U-I-Kennlinie des LiFePo-Akkumoduls

#### Messwerte

$U_0 = 3,24V$

$R_{Pot}$ in $\Omega$	100	80	60	50	40	30	20	15	10
$U_{Last}$ in V	3,22	3,21	3,21	3,20	3,19	3,18	3,16	3,11	3,08
$I_{Last}$ in mA	32	40	52	63	80	105	142	217	294

#### Diagramme



#### Auswertung

2.

Ladezustand: etwa 40%

Restkapazität:

$$\frac{x}{200mAh} = \frac{40}{100} \rightarrow x = \underline{\underline{80mAh}}$$



## 4.3 U-I-Kennlinie des LiFePo-Akkumoduls

### Auswertung

3.

#### Vorteile:

- hohe (thermische) Sicherheit durch feste Zellchemie
- hohe Leistungsdichte
- hohe Ladeströme möglich
- hohe Zyklenfestigkeit
- flaches Spannungsprofil der Kennlinie beim Laden und Entladen
- breiter Temperaturbereich für Anwendung und Lagerung
- geringe Selbstentladung

#### Nachteile:

- kaum genormte Bauformen
- geringe Energiedichte
- Schutzschaltungen und Batteriemanagementsysteme nötig
- Bestimmung des Ladezustands schwierig durch flache Kennlinie

4.

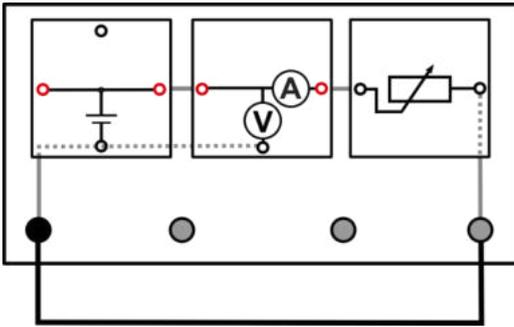
- Vor allem im Mobilitätsbereich: Starterbatterien, Nutzbatterie in Yachten und Wohnmobilen, Gabelstapler
- Elektrobusse, -boote, -motorräder, -fahrräder
- Speicherbatterie für erneuerbare Energien, v.a. Photovoltaik-Anlagen
- Batterie-Speicherkraftwerke
- Akkubetriebene Werkzeuge

## 4.4 U-I-Kennlinie des Blei-Akkumoduls

### Aufgabe

Ermitteln Sie die U-I-Kennlinie des Blei-Akkumoduls.

### Aufbau



### Benötigte Geräte

- 1 Grundeinheit
- 1 Akkumodul Pb
- 1 Potentiometermodul
- 1 AV-Modul
- 1 Laborkabel

### Durchführung

1. Bauen Sie den Versuch entsprechend dem Schaltplan auf. Stecken Sie das Potentiometermodul noch nicht auf.
2. Messen Sie zunächst die Leerlaufspannung des Akku-Moduls  $U_0$  und tragen Sie Ihren Messwert in die Tabelle ein.
3. Stellen Sie am Potentiometer einen Widerstand  $R_{Pot}$  von  $60\Omega$  ein und stecken Sie das Modul auf die Grundeinheit. Messen Sie die Spannung  $U_{Last}$  und den Strom  $I_{Last}$  bei geschlossenem Stromkreis. Das AV-Modul wird im Strom-Spannungs-Modus betrieben. Tragen Sie ihre Messwerte in die Tabelle ein.
4. Verringern Sie in mehreren Schritten den Widerstand  $R_{Pot}$  am Potentiometer und bestimmen Sie für verschiedene Widerstände jeweils die Spannung  $U_{Last}$  und den Strom  $I_{Last}$ .

**Hinweis:** Unterbrechen Sie den Stromfluss (zum Beispiel durch Entfernen des Kabels) nach jeder Einzelmessung, um eine zu starke Entladung des Moduls während des Experiments zu vermeiden.

### Auswertung

1. Stellen Sie Ihre Messwerte in einem Diagramm dar.
2. Vergleichen Sie ihre gemessene Kennlinie mit den beigefügten Kennlinien und treffen Sie eine Aussage zum Zustand der Zelle. Berechnen Sie die Restkapazität des Akku-Moduls. Hinweise zur Berechnung finden Sie im Versuch „Die Nennspannung und Kapazität von Spannungsquellen“.
3. Erklären Sie in Bezug auf den Blei-Akku den Begriff Sulfatierung.
4. Erläutern Sie, weshalb die Elektroden bei Blei-Akkus in der Automobilindustrie oftmals hochpräzise ausgeführt sind.
5. Nennen Sie Faktoren, die zum Alterungsprozess von Blei-Akkus beitragen.



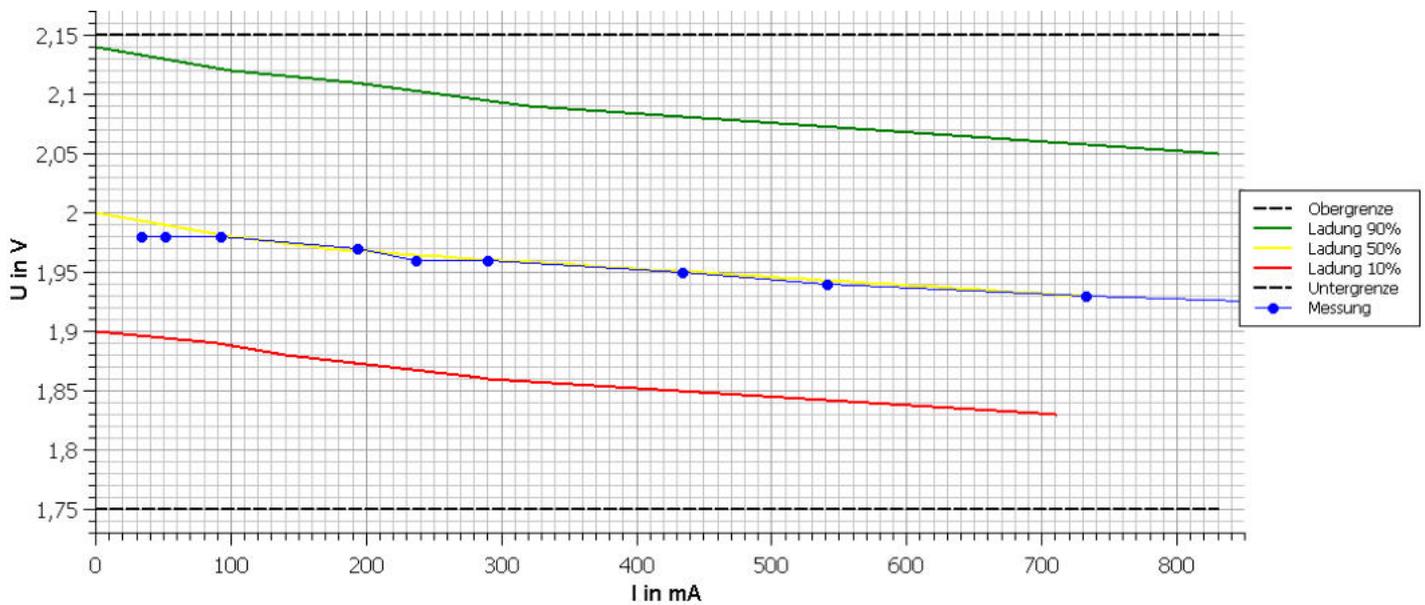
### 4.4 U-I-Kennlinie des Blei-Akkumoduls

#### Messwerte

$U_0 = 1,99V$

$R_{Pot}$ in $\Omega$	60	40	20	10	8	6	4	3	2	1
$U_{Last}$ in V	1,98	1,98	1,98	1,97	1,96	1,96	1,95	1,94	1,93	1,91
$I_{Last}$ in mA	33	51	92	193	237	290	434	541	732	1220

#### Diagramme



#### Auswertung

2.

Ladezustand: etwa 50%

Restkapazität:

$$\frac{x}{2500mAh} = \frac{50}{100} \rightarrow x = \underline{\underline{1250mAh}}$$



## 4.4 U-I-Kennlinie des Blei-Akkumoduls

### Auswertung

3.

Sulfatierung bezeichnet die Ablagerung von Bleisulfat an der Oberfläche des aktiven Materials der Bleiplatten. Dies kann zur Bildung großer Kristalle führen, welche die Effizienz des Blei-Akkus erheblich einschränken, beziehungsweise sogar zur Zerstörung des Akkus führen können. Ursache dieses Prozesses ist im Allgemeinen die Lagerung des Akkus im entladene Zustand, beziehungsweise der Betrieb bei zu hohen Temperaturen.

4.

Durch die poröse Ausführung der Elektroden wird eine deutlich größere Oberfläche pro Volumen erreicht. Dadurch wird der für Blei-Akkus typischerweise hohe Innenwiderstand verringert. Durch die große Oberfläche kann der Akku deutlich mehr Strom liefern als mit einer einfachen Blech-Elektrode. Vor allem bei Autobatterien wird diese Bauweise angewendet, um einen erfolgreichen Kaltstart zu ermöglichen. Ein weiterer Vorteil ist die vergleichsweise hohe Kapazität bei kleinem Volumen.

5.

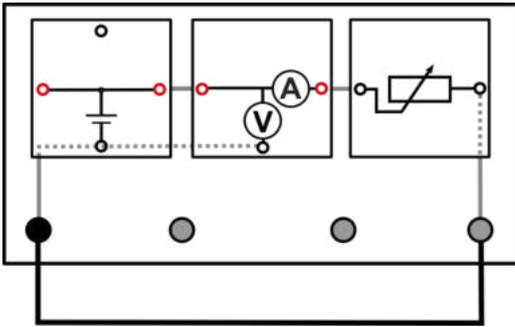
- Plattenkorrosion: Alterung der positiven Platten (Gitterkorrosion, Umwandlung von Blei in Bleioxid und Bleimonoxid)
- Gitterwachstum (Durch Umwandlung von Blei in Bleioxid mit 1,4fachem Volumen kommt es zum Gitterwachstum und schlussendlich zur Zerstörung der Gitterplatten)
- Wasserverlust (Durch Zersetzung in Wasserstoff und Sauerstoff, das Wasser lässt sich bei geschlossenen Akkutypen nicht nachfüllen. Dadurch steigt die Säuredichte an und der Elektrolytstand sinkt)
- Abschlämmung (bei Entladung anfallendes Bleisulfat nimmt deutlich höheres Volumen als Blei ein, damit kommt es bei der Entladung zu starken mechanischen Kräften auf die Gitterplatten. Bei Aufladung entstehende Gasbläschen drücken einzelne Bleikrümel aus dem Verbund, diese fallen nach unten in den Schlammraum. Folge ist vor allem ein Kapazitätsverlust.)
- Verbleiung (das Schwammblei ist mit kleinen Spacern versetzt, die die Poren zum Elektrolytaustausch offen halten sollen. Durch Lade- und Entladeprozesse kommt es zur Verdichtung der Poren und daraus resultierend ein erhöhter Innenwiderstand durch verhinderte Elektrolyt-Diffusion.)
- Beschleunigte Selbstentladung (Bleisulfat ist zwar nicht in Schwefelsäure löslich, aber in Wasser. Beim Entladeprozess verringert sich die Säuredichte und das Bleisulfat beginnt, sich im Elektrolyten zu lösen und kann durch Diffusion abtransportiert werden. Folge ist ein Kapazitätsverlust und Ausbildung von Kriechbrücken innerhalb der Separatoren, welche die Selbstentladung beschleunigen)
- Sulfatierung (siehe 3.)

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

### Aufgabe

Ermitteln Sie die U-I-Kennlinie des Lithium-Polymer-Akkumoduls.

### Aufbau



### Benötigte Geräte

- 1 Grundeinheit
- 1 Akkumodul LiPo
- 1 Potentiometermodul
- 1 AV-Modul
- 1 Laborkabel

### Durchführung

1. Bauen Sie den Versuch entsprechend dem Schaltplan auf. Stecken Sie das Potentiometermodul noch nicht auf.
2. Messen Sie zunächst die Leerlaufspannung des Akku-Moduls  $U_0$  und tragen Sie Ihren Messwert in die Tabelle ein.
3. Stellen Sie am Potentiometer einen Widerstand  $R_{Pot}$  von  $60\Omega$  ein und stecken Sie das Modul auf die Grundeinheit. Messen Sie die Spannung  $U_{Last}$  und den Strom  $I_{Last}$  bei geschlossenem Stromkreis. Das AV-Modul wird im Strom-Spannungs-Modus betrieben. Tragen Sie ihre Messwerte in die Tabelle ein.
4. Verringern Sie in mehreren Schritten den Widerstand  $R_{Pot}$  am Potentiometer und bestimmen Sie für verschiedene Widerstände jeweils die Spannung  $U_{Last}$  und den Strom  $I_{Last}$ .

**Hinweis:** Unterbrechen Sie den Stromfluss (zum Beispiel durch Entfernen des Kabels) nach jeder Einzelmessung, um eine zu starke Entladung des Moduls während des Experiments zu vermeiden.

### Auswertung

1. Stellen Sie Ihre Messwerte in einem Diagramm dar.
2. Vergleichen Sie ihre gemessene Kennlinie mit den beigefügten Kennlinien und treffen Sie eine Aussage zum Zustand der Zelle. Berechnen Sie die Restkapazität des Akku-Moduls. Hinweise zur Berechnung finden Sie im Versuch „Die Nennspannung und Kapazität von Spannungsquellen“.
3. Benennen Sie wichtige Anwendungsbereiche von Lithium-Polymer-Akkus.
4. Benennen Sie Maßnahmen, die die Lebensdauer eines Lithium-Polymer-Akkus verlängern.



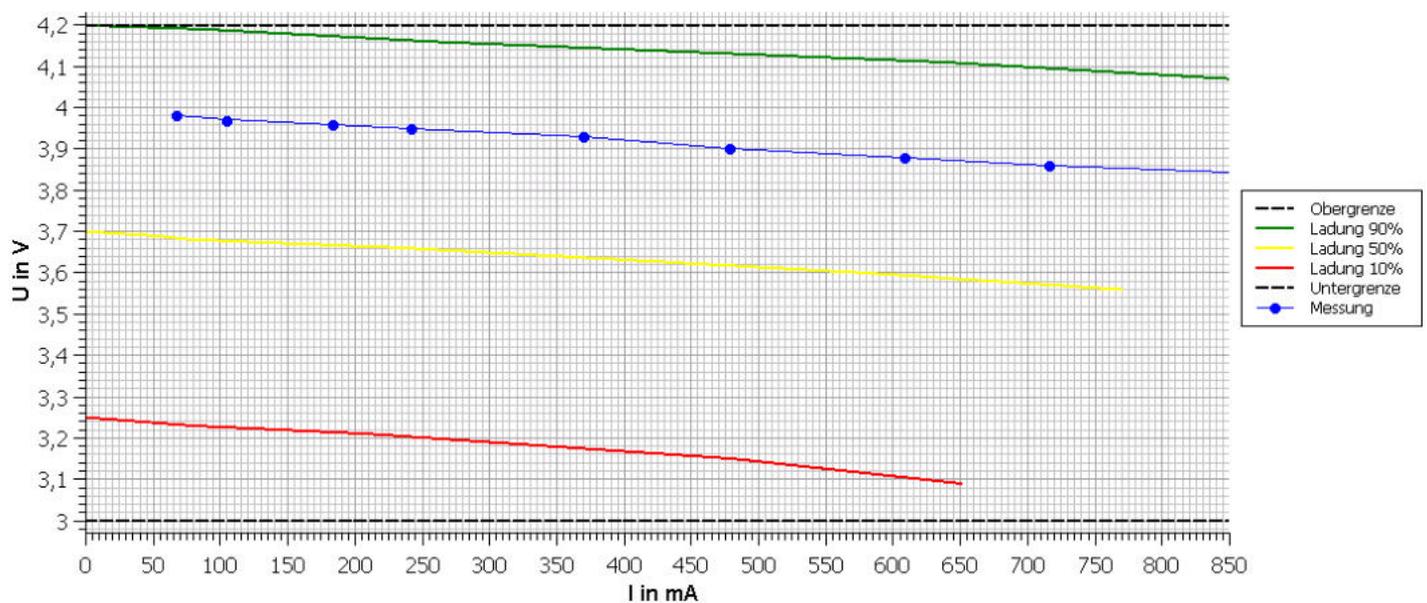
## 4.5 U-I-Kennlinie des Lithium-Polymer-Akkumoduls

## 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

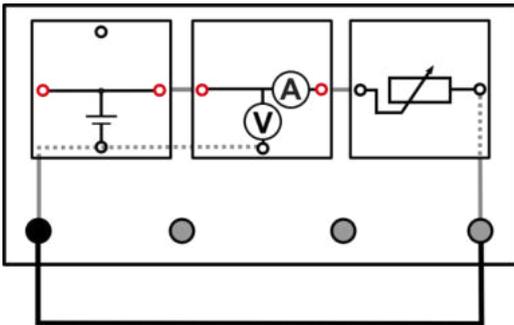
3.
  - Elektrofahrzeuge
  - Modellbau
  - Mobiltelefone
  - Elektronische Kleingeräte wie MP3-Player oder Laptops
  - Ortsfeste Kraftwerks-Energiespeicher
  
4.
  - Häufiges Nachladen ohne Überladung (flache Entladezyklen)
  - Hochwertige Elektronik des Batteriemanagementsystems
  - Lagerung eher kühl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

## 4.6 U-I-Kennlinie des dreifachen NiMH-Akkumoduls

### Aufgabe

Ermitteln Sie die U-I-Kennlinie des dreifachen NiMH-Akkumoduls.

### Aufbau



### Benötigte Geräte

- 1 Grundeinheit
- 1 Akkumodul NiMH, dreifach
- 1 Potentiometermodul
- 1 AV-Modul
- 1 Laborkabel

### Durchführung

1. Bauen Sie den Versuch entsprechend dem Schaltplan auf. Stecken Sie das Potentiometermodul noch nicht auf.
2. Messen Sie zunächst die Leerlaufspannung des Akku-Moduls  $U_0$  und tragen Sie Ihren Messwert in die Tabelle ein.
3. Stellen Sie am Potentiometer einen Widerstand  $R_{Pot}$  von  $100\Omega$  ein und stecken Sie das Modul auf die Grundeinheit. Messen Sie die Spannung  $U_{Last}$  und den Strom  $I_{Last}$  bei geschlossenem Stromkreis. Das AV-Modul wird im Strom-Spannungs-Modus betrieben. Tragen Sie ihre Messwerte in die Tabelle ein.
4. Verringern Sie in mehreren Schritten den Widerstand  $R_{Pot}$  am Potentiometer und bestimmen Sie für verschiedene Widerstände jeweils die Spannung  $U_{Last}$  und den Strom  $I_{Last}$ .

**Hinweis:** Unterbrechen Sie den Stromfluss (zum Beispiel durch Entfernen des Kabels) nach jeder Einzelmessung, um eine zu starke Entladung des Moduls während des Experiments zu vermeiden.

### Auswertung

1. Stellen Sie Ihre Messwerte in einem Diagramm dar.
2. Vergleichen Sie ihre gemessene Kennlinie mit den beigefügten Kennlinien und treffen Sie eine Aussage zum Zustand der Zelle. Berechnen Sie die Restkapazität des Akku-Moduls. Hinweise zur Berechnung finden Sie im Versuch „Die Nennspannung und Kapazität von Spannungsquellen“.
3. Berechnen Sie, welche Gesamtspannung und Gesamtkapazität (Ah) eine Reihenschaltung aus zwei Batterien mit je 12V Leerlaufspannung und 50Ah Kapazität besitzt.



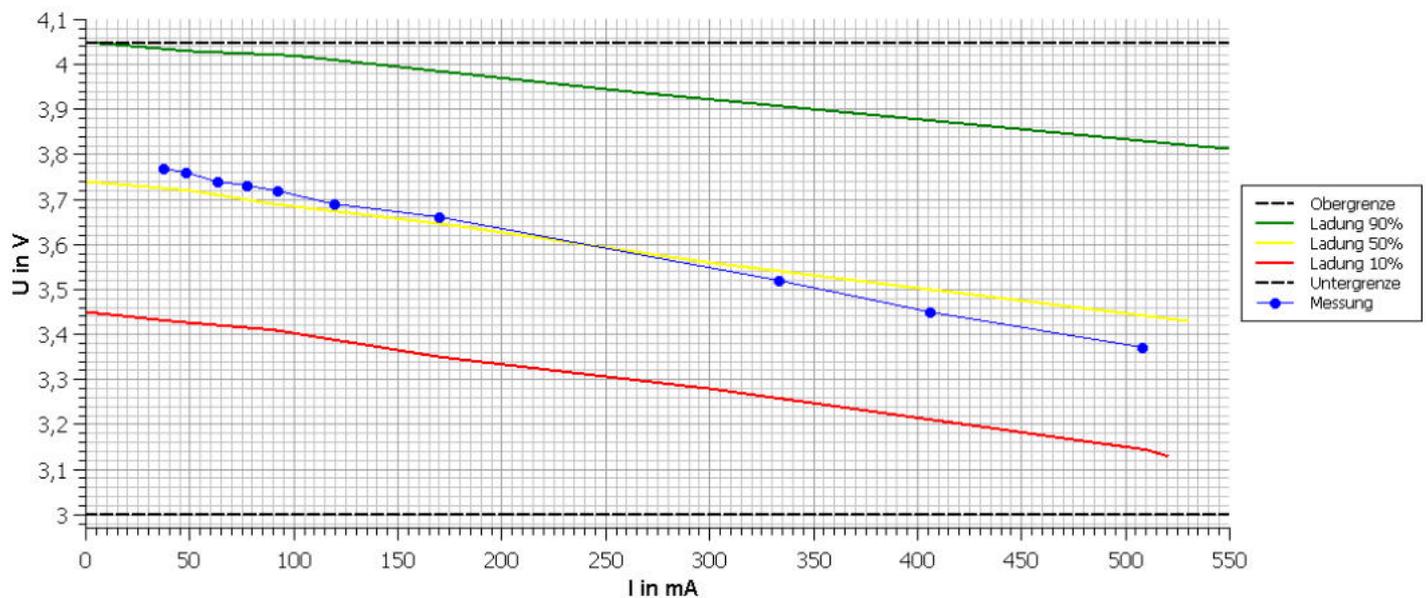
## 4.6 U-I-Kennlinie des dreifachen NiMH-Akkumoduls

## Messwerte

$$U_0 = 3,79V$$

$R_{Pot}$ in $\Omega$	100	80	60	50	40	30	20	10	8	6
$U_{Last}$ in V	3,77	3,76	3,74	3,73	3,72	3,69	3,66	3,52	3,45	3,37
$I_{Last}$ in mA	37	48	63	77	92	119	170	333	406	508

## Diagramme



## Auswertung

2.

Der Ladezustand beträgt zu Beginn des Versuchs etwa 60%. Es wird deutlich, dass der Akku sich im Laufe des Experiments entlädt, sodass sich der Ladezustand am Ende des Experiments (wenn höhere Ströme gemessen werden) auf etwa 40% verringert. Dadurch verläuft die Kennlinie nicht parallel zu den vorgegebenen Kennlinien.



## 4.6 U-I-Kennlinie des dreifachen NiMH-Akkumoduls

## Auswertung

2.

Ladezustand: etwa 50%

Restkapazität:

$$\frac{x}{600mAh} = \frac{50}{100} \rightarrow x = \underline{\underline{300mAh}}$$

3.

Die Gesamtspannung addiert sich zu  $12V+12V=24V$ 

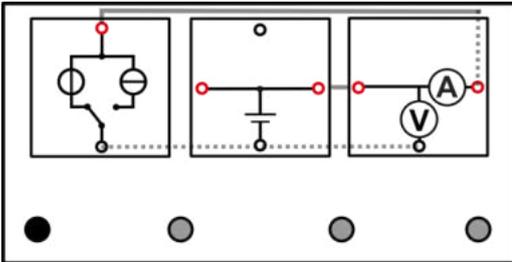
Die Gesamtkapazität entspricht der Kapazität der Einzelzellen 50Ah.

## 5.1 Das Ladeverfahren des NiMH-Akkus

### Aufgabe

Laden Sie den NiMH-Akku mithilfe des ChargerModuls.

### Aufbau



### Benötigte Geräte

- 1 Grundeinheit
- 1 ChargerModul
- 1 NiMH-Akku, einfach
- 1 AV-Modul
- 1 Laborkabel

### Durchführung

1. Bauen Sie den Versuch entsprechend dem Schaltplan auf. Verwenden Sie das ChargerModul im NiMH-Modus (NiMH,einfach). Hinweise zur Handhabung des ChargerModuls finden Sie auf Seite 42. Schalten Sie den Charger noch nicht ein.
2. Messen und erfassen Sie die Leerlaufspannung  $U_0$  des NiMH-Moduls.

**Hinweis:** Das Akku-Modul sollte zu Beginn des Versuchs zu nicht mehr als etwa 50% Prozent geladen sein (dies entspricht einer Leerlaufspannung von etwa 1,18V). Zum Entladen kann der Akku mit Hilfe der Widerstände auf den gewünschten Ladezustand gebracht werden. Falls der Ladezustand unterhalb von 50% liegt, dauert der Versuch einfach entsprechend länger.

3. Nehmen Sie den Ladevorgang auf, indem Sie bis zum Abbruch des Ladeprogramms in Abständen von 1min die Spannung  $U$  und Stromstärke  $I$  am Akkumodul erfassen. Das AV-Modul wird dazu im Strom-Spannungsmodus betrieben.

### Auswertung

1. Tragen Sie Ihre Messwerte in das Diagramm ein.
2. Beschreiben und erklären Sie das Verhalten von Strom und Spannung während des Ladevorgangs.
3. Erklären Sie den *Memory-Effekt* und den *Lazy-Effekt*. Erläutern Sie die Bedeutung der beide Effekte bei herkömmlichen NiMH-Akkus.
4. Erklären Sie den Begriff *Zykeln*.



## 5.1 Das Ladeverfahren des NiMH-Akkus

## Messwerte

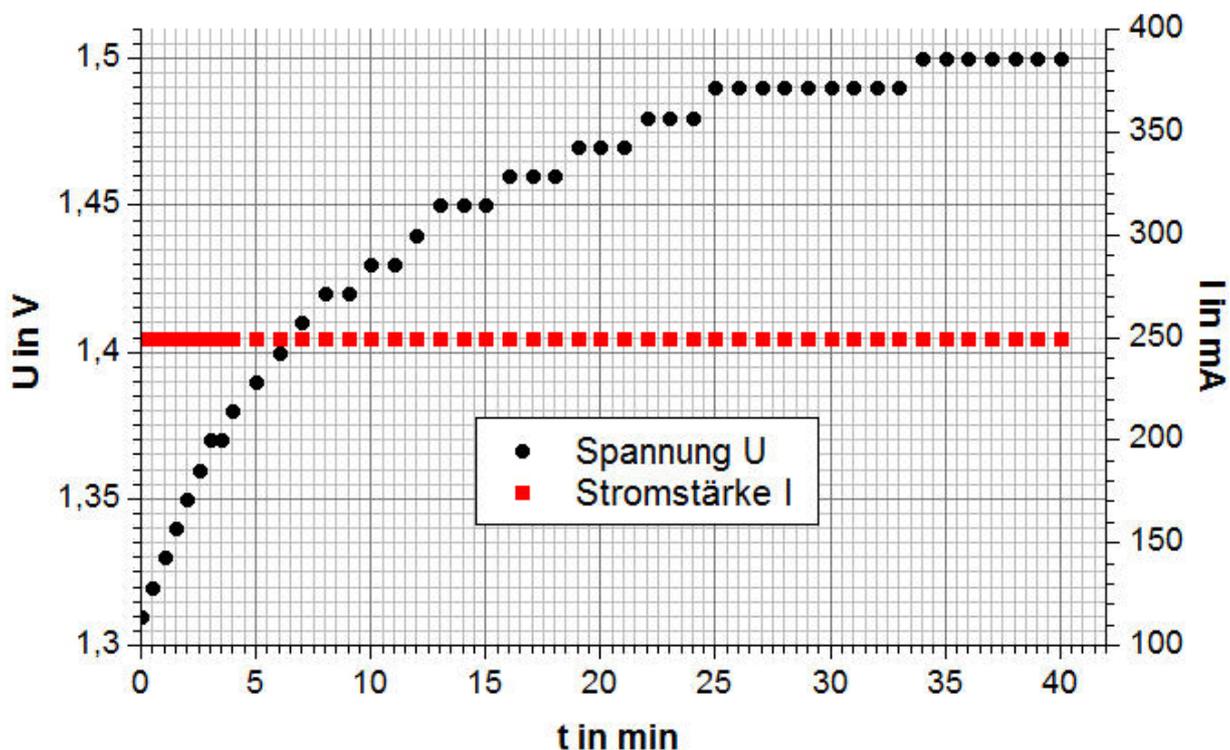
$$U_0(1) = 1,22V$$

t in min	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	5	6	7	8
U in V	1,31	1,32	1,33	1,34	1,35	1,36	1,37	1,37	1,38	1,39	1,40	1,41	1,42
I in mA	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250

t in min	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
U in V	1,42	1,43	1,43	1,44	1,45	1,45	1,45	1,46	1,46	1,46	1,47	1,47
I in mA	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250

t in min	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	35	40
U in V	1,47	1,48	1,48	1,48	1,49	1,49	1,49	1,49	1,49	1,49	1,50	1,50
I in mA	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250

## Diagramme





## 5.2 Das Ladeverfahren des NiMH-Akkus

## Auswertung

2.

Die Spannung steigt zunächst schnell, dann langsamer an bis zu einem Wert von 1,5V. Anschließend schaltet der Charger den Ladeprozess ab. Die Stromstärke bleibt während des Ladeprozesses konstant. Das liegt daran, dass der Charger beim Laden des NiMH-Akkus im CC-Verfahren arbeitet (Constant Current).

3.

*Memory-Effekt:* Dieser Effekt tritt auf, wenn Akkus nicht vollständig entladen und anschließend wieder aufgeladen werden. Der Akku „merkt“ sich diese Teilentladung und kann dadurch nicht mehr seine volle Nennkapazität zur Verfügung stellen. Der Memory-Effekt tritt vor allem bei NiCd-Akkus auf und wird durch Kristallbildung an der Cadmium-Kathode hervorgerufen. Teilweise kann der Effekt durch Tiefentladen und das sogenannte Zykeln (siehe 4.) rückgängig gemacht werden.

*Lazy-Effekt:* Dieser Effekt ist ein ähnliches Phänomen wie Memory-Effekt, aber die Folge ist kein plötzlicher Kapazitätsverlust, sondern ein langsamer Spannungsabfall. Im Gegensatz zum Memory-Effekt wird der Akku nicht geschädigt (die Folgen können durch Zykeln vollständig beseitigt werden.)

4.

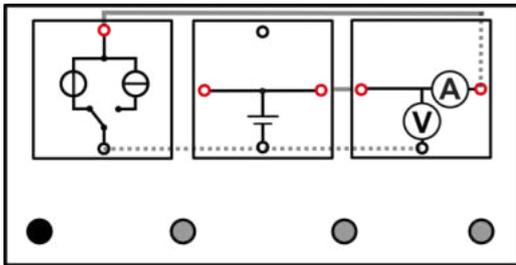
Unter Zykeln versteht man das mehrmalige (2-3 mal) Hintereinander Ausführen des Lade- und Entladeprozesses. Dadurch erhält der Akku im besten Fall seine ursprüngliche Kapazität zurück. Regelmäßiges Zykeln wird für fast alle Akku-Typen empfohlen, vor allem wenn Lagerzeit und Ladezustand der Akkus unbekannt sind.

## 5.2 Das Ladeverfahren des NiZn-Akkus

### Aufgabe

Laden Sie den NiZn-Akku mithilfe des ChargerModuls.

### Aufbau



### Benötigte Geräte

- 1 Grundeinheit
- 1 ChargerModul
- 1 NiZn-Akku
- 1 AV-Modul
- 1 Laborkabel

### Durchführung

1. Bauen Sie den Versuch entsprechend dem Schaltplan auf. Verwenden Sie das ChargerModul im NiZn-Modus. Hinweise zur Handhabung des ChargerModuls finden Sie auf Seite 42. Schalten Sie den Charger noch nicht ein.
2. Messen und erfassen Sie die Leerlaufspannung  $U_0$  des NiZn-Moduls.

**Hinweis:** Das Akku-Modul sollte zu Beginn des Versuchs maximal zu etwa 20% Prozent geladen sein (dies entspricht einer Leerlaufspannung von etwa 1,4V). Zum Entladen kann der Akku mit Hilfe der Widerstände auf den gewünschten Ladezustand gebracht werden. Falls der Ladezustand unterhalb von 20% liegt, dauert der Versuch einfach entsprechend länger.

3. Nehmen Sie den Ladevorgang auf, indem Sie bis zum Abbruch des Ladeprogramms in Abständen von 10s die Spannung  $U$  und Stromstärke  $I$  am Akkumodul erfassen. Das AV-Modul wird dazu im Strom-Spannungsmodus betrieben.

### Auswertung

1. Tragen Sie Ihre Messwerte in das Diagramm ein.
2. Beschreiben und begründen Sie das Verhalten von Strom und Spannung während des Ladevorgangs.
3. Bestimmen Sie die Zeit  $t_c$ , nach welcher der Wechsel zwischen dem CC-Modus (Constant Current) und dem CV-Modus (Constant Voltage) stattfindet.
4. Erklären Sie, weshalb die Spannung im CV-Modus weiterhin leicht ansteigt (trotz einer angelegten konstanten Spannung).



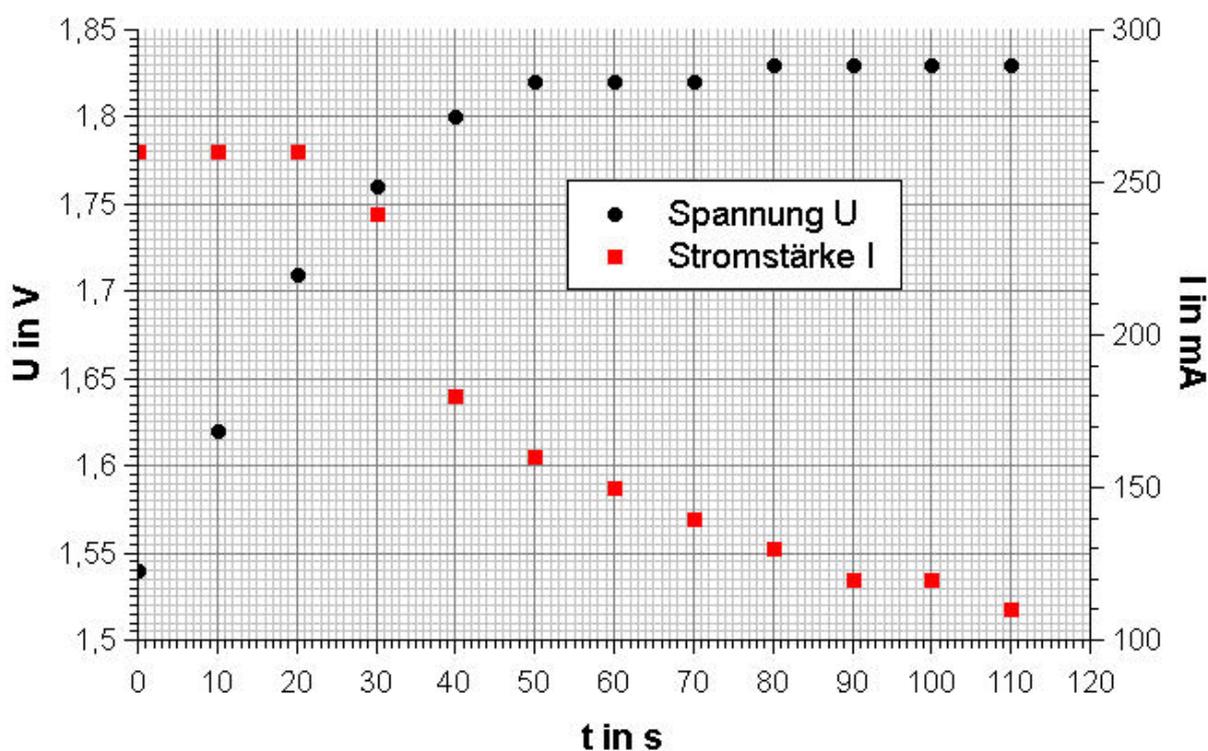
## 5.2 Das Ladeverfahren des NiZn-Akkus

## Messwerte

$$U_0(1) = 1,47V$$

t in s	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
U in V	1,54	1,62	1,71	1,76	1,80	1,82	1,82	1,82	1,83	1,83	1,83	1,83	1,83
I in mA	260	260	260	240	180	160	150	140	130	120	120	120	110

## Diagramme



## Auswertung

2.

Beim Laden des NiZn-Akkus wird ein CC-CV-Verfahren angewendet. Der Ladeprozess beginnt mit dem CC-Verfahren, bei dem die Stromstärke konstant bleibt. In diesem Bereich steigt die Spannung an bis auf ca. 1,8V. Wenn die Schwellenspannung erreicht ist, erfolgt der Wechsel in den CV-Modus (Constant Voltage). Im CV-Modus bleibt die Spannung nahezu konstant und die Stromstärke sinkt bis zum Abbruch des Ladeprogramms.

3.  $t_c=30s$



## 5.2 Das Ladeverfahren des NiZn-Akkus

### Auswertung

4.

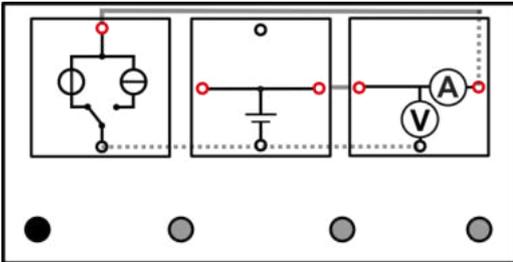
Beim Laden im CV-Modus gibt der Charger eine konstante Spannung aus. Ein Teil dieser Spannung fällt dabei über dem Innenwiderstand der PTC-Sicherung des Akkumoduls ab. Wenn die Stromstärke sinkt (was ein charakteristisches Merkmal des CV-Ladeprozesses ist), dann sinkt die Spannung, welche über dem PTC-Widerstand abfällt. Dadurch steigt die Spannung, welche am Modul tatsächlich anliegt, weiterhin leicht an (da die Gesamtspannung konstant bleibt).

## 5.3 Das Ladeverfahren des LiFePo-Akkus

### Aufgabe

Laden Sie den LiFePo-Akku mithilfe des ChargerModuls.

### Aufbau



### Benötigte Geräte

- 1 Grundeinheit
- 1 ChargerModul
- 1 LiFePo-Akku
- 1 AV-Modul
- 1 Laborkabel

### Durchführung

1. Bauen Sie den Versuch entsprechend dem Schaltplan auf. Verwenden Sie das ChargerModul im LiFePo-Modus. Hinweise zur Handhabung des ChargerModuls finden Sie auf Seite 42. Schalten Sie den Charger noch nicht ein.
2. Messen und erfassen Sie die Leerlaufspannung  $U_0$  des LiFePo-Moduls.

**Hinweis:** Das Akku-Modul sollte zu Beginn des Versuchs maximal zu etwa 50% Prozent geladen sein (dies entspricht einer Leerlaufspannung von etwa 3,3V). Zum Entladen kann der Akku mit Hilfe der Widerstände auf den gewünschten Ladezustand gebracht werden. Falls der Ladezustand unterhalb von 50% liegt, dauert der Versuch einfach entsprechend länger.

3. Nehmen Sie den Ladevorgang auf, indem Sie bis zum Abbruch des Ladeprogramms in Abständen von 1min die Spannung  $U$  und Stromstärke  $I$  am Akkumodul erfassen. Das AV-Modul wird dazu im Strom-Spannungsmodus betrieben.

### Auswertung

1. Tragen Sie Ihre Messwerte in das Diagramm ein.
2. Beschreiben und begründen Sie das Verhalten von Strom und Spannung während des Ladevorgangs.
3. Bestimmen Sie die Zeit  $t_c$ , nach welcher der Wechsel zwischen dem CC-Modus (Constant Current) und dem CV-Modus (Constant Voltage) stattfindet.
4. Begründen Sie die kleinen „Buckel“ in der Entladekurve eines LiFePo-Akkus.
5. Erläutern Sie den Einfluss der Entladetiefe auf die Lebensdauer von LiFePo-Akkus.



## 5.3 Das Ladeverfahren des LiFePo-Akkus

## Messwerte

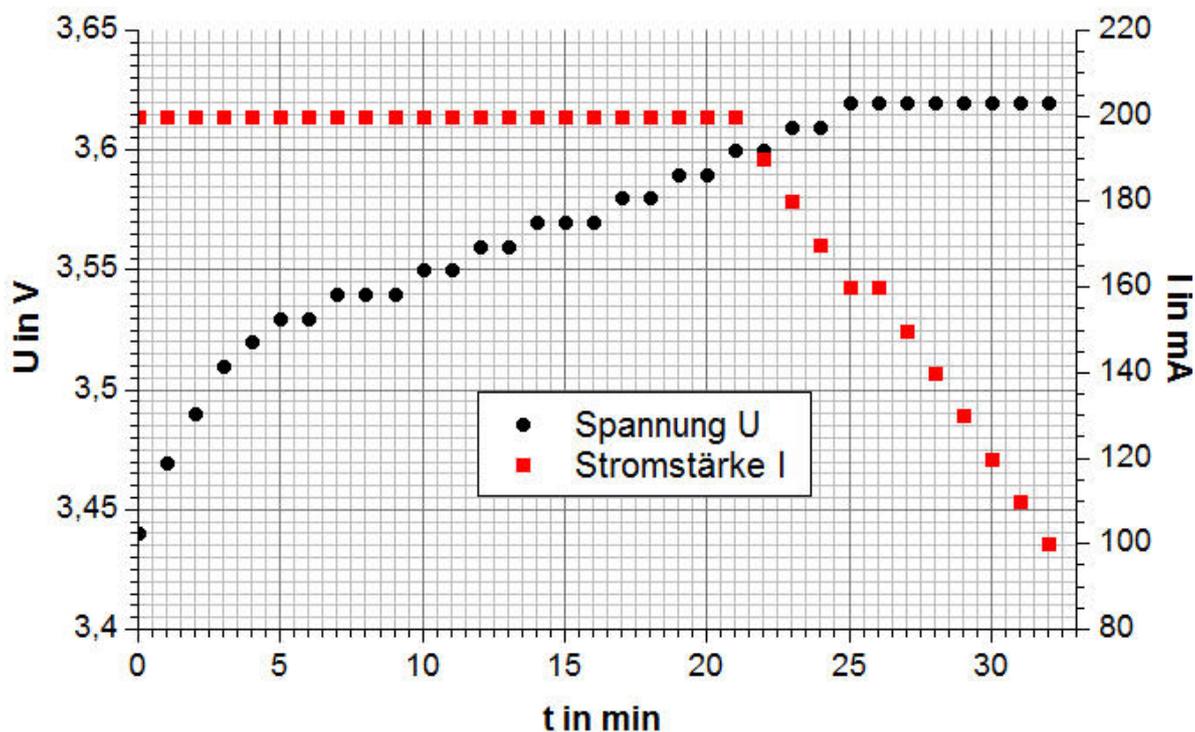
$$U_0(1) = 3,32V$$

t in min	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
U in V	3,44	3,47	3,49	3,51	3,52	3,53	3,53	3,54	3,54	3,54	3,55	3,55
I in mA	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200

t in min	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
U in V	3,56	3,56	3,57	3,57	3,57	3,58	3,58	3,59	3,59	3,6	3,6	3,61
I in mA	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	190	180

t in min	24	25	26	27	28	29	30	31	32
U in V	3,61	3,62	3,62	3,62	3,62	3,62	3,62	3,62	3,62
I in mA	170	160	160	150	140	130	120	110	100

## Diagramme





## 5.3 Das Ladeverfahren des LiFePo-Akkus

### Auswertung

2.

Beim Laden des LiFePo-Akkus wird ein CC-CV-Verfahren angewendet. Der Ladeprozess beginnt mit dem CC-Verfahren, bei dem die Stromstärke konstant bleibt. In diesem Bereich steigt die Spannung an bis auf ca. 3,6. Wenn die Schwellspannung erreicht ist, erfolgt der Wechsel in den CV-Modus (**C**onstant **V**oltage). Im CV-Modus bleibt die Spannung nahezu konstant und die Stromstärke sinkt bis zum Abbruch des Ladeprogramms.

3.  $t_c=22\text{min}$

4.

Durch den Phasenübergang einzelner Partikel des aktiven Materials treten in der Entladekurve kleine Buckel auf. Diese werden als Memory-Effekt bezeichnet, haben aber nichts mit dem bekannteren Effekt bei NiMH-Akkus zu tun. Die Lebensdauer oder Leistungsfähigkeit der Akkus werden durch diesen Effekt nicht beeinträchtigt. Problematisch kann einzig die Ladezustandsanzeige sein, zumal die LiFePo-Akkus im Bereich der Nennspannung einen sehr geringen Spannungsabfall über der Entladetiefe aufweisen, was die Ladezustandsanzeige an sich schon erschwert.

5.

Vor allem die regelmäßig genutzte Entladetiefe beeinflusst die Lebensdauer der LiFePo-Akkus. Dabei senkt das zu starke Entladen oder die Lagerung an der unteren Spannungsgrenze die Lebensdauer deutlich herab, da es in diesem Fall zu irreversiblen Prozessen innerhalb der Zelle kommt.

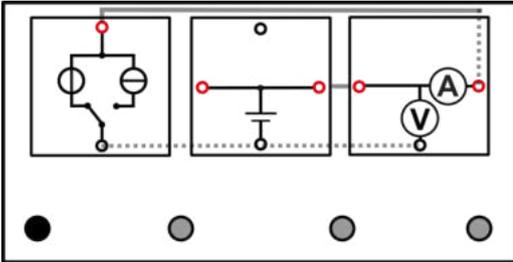
Die Einhaltung von geringen Entladetiefen wird im Allgemeinen über Batteriemangement-Systeme gewährleistet.

## 5.4 Das Ladeverfahren des Blei-Akkus

### Aufgabe

Laden Sie den Blei-Akku mithilfe des ChargerModuls.

### Aufbau



### Benötigte Geräte

- 1 Grundeinheit
- 1 ChargerModul
- 1 Blei-Akku
- 1 AV-Modul
- 1 Laborkabel

### Durchführung

1. Bauen Sie den Versuch entsprechend dem Schaltplan auf. Verwenden Sie das ChargerModul im Blei-Modus. Hinweise zur Handhabung des ChargerModuls finden Sie auf Seite 42. Schalten Sie den Charger noch nicht ein.
2. Messen und erfassen Sie die Leerlaufspannung  $U_0$  des Blei-Moduls.

**Hinweis:** Das Akku-Modul sollte zu Beginn des Versuchs maximal zu etwa 50% Prozent geladen sein (dies entspricht einer Leerlaufspannung von etwa 2,03V). Zum Entladen kann der Akku mit Hilfe der Widerstände auf den gewünschten Ladezustand gebracht werden. Falls der Ladezustand unterhalb von 50% liegt dauert der Versuch einfach entsprechend länger.

3. Nehmen Sie den Ladevorgang auf, indem Sie bis zum Abbruch des Ladeprogramms in Abständen von 1min die Spannung  $U$  und Stromstärke  $I$  am Akkumodul erfassen. Das AV-Modul wird dazu im Strom-Spannungsmodus betrieben.

### Auswertung

1. Tragen Sie Ihre Messwerte in das Diagramm ein.
2. Beschreiben und begründen Sie das Verhalten von Strom und Spannung während des Ladevorgangs.
3. Bestimmen Sie die Zeit  $t_c$ , nach welcher der Wechsel zwischen dem CC-Modus (Constant Current) und dem CV-Modus (Constant Voltage) stattfindet.
4. Erklären Sie den Begriff *Gasungsspannung*.
5. Erläutern Sie den Einfluss der Temperatur auf die Ladeschlussspannung eines Blei-Akkus.



## 5.4 Das Ladeverfahren des Blei-Akkus

## Messwerte

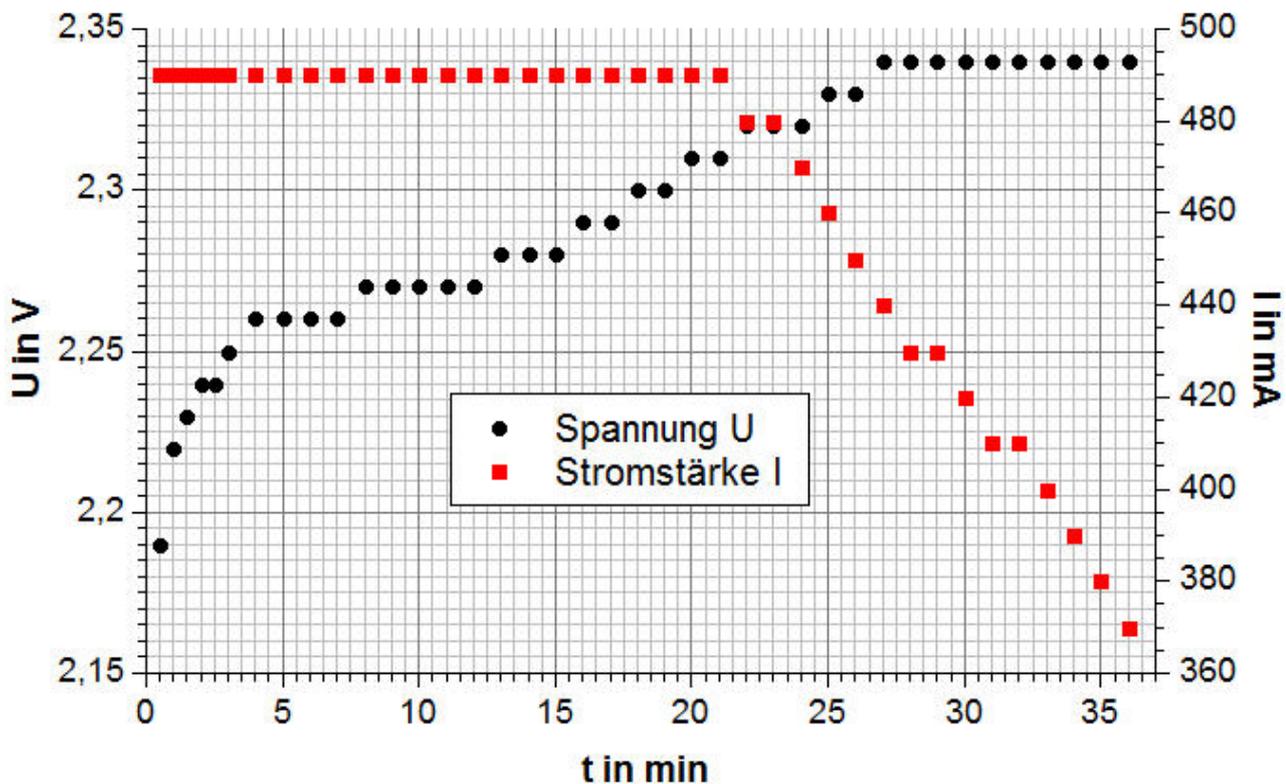
$$U_0(1) = 1,99V$$

t in min	0,5	1	1,5	2	2,5	3	4	5	6	7	8	9	10
U in V	2,19	2,22	2,23	2,24	2,24	2,25	2,26	2,26	2,26	2,26	2,27	2,27	2,27
I in mA	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49

t in min	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
U in V	2,27	2,27	2,28	2,28	2,28	2,29	2,29	2,30	2,30	2,31	2,31	2,32	2,32
I in mA	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,48	0,48

t in min	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
U in V	2,32	2,33	2,33	2,34	2,34	2,34	2,34	2,34	2,34	2,34	2,34	2,34	2,34
I in mA	0,47	460	450	440	430	430	420	410	410	400	390	380	370

## Diagramme





## 5.4 Das Ladeverfahren des Blei-Akkus

## Auswertung

2.

Beim Laden des Blei-Akkus wird ein CC-CV-Verfahren angewendet. Der Ladeprozess beginnt mit dem CC-Verfahren, bei dem die Stromstärke konstant bleibt. In diesem Bereich steigt die Spannung an bis auf ca. 2,35V. Wenn die Schwellspannung erreicht ist, erfolgt der Wechsel in den CV-Modus (Constant Voltage). Im CV-Modus bleibt die Spannung nahezu konstant und die Stromstärke sinkt bis zum Abbruch des Ladeprogramms.

3.  $t_c=22\text{min}$ 

4.

Unter Gasungsspannung versteht man die Spannung, bei der es nicht zur weiteren Aufladung des Akkus kommt, sondern der zugeführte Strom für die Aufspaltung und Zersetzung des Wassers im Elektrolyten aufgewendet wird (Zersetzung in Wasserstoff und Sauerstoff).

5.

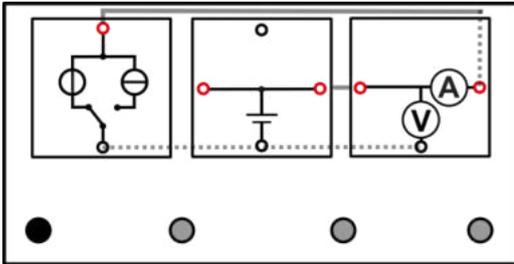
Die Umgebungstemperatur ist ein wichtiger Faktor beim Laden des Akkus. Bei niedrigen Temperaturen steigt die Ladeschlussspannung. Bei hohen Temperaturen sollte der Akku mit einer niedrigeren Ladeschlussspannung geladen werden. Üblicherweise wird eine Ladetemperatur von 25°C angegeben und für die Zellen wird eine manuelle Anpassung der Ladeschlussspannung (LSS) von 4mV/°C angesetzt. So steigt bei einer Temperatur von -5°C die LSS eines 12V Akku-Blocks um 0,72V ( $4\text{mV} * 6\text{Zellen} * 30^\circ\text{C}=0,72\text{V}$ ). Bei einer Temperatur von 30°C ist die LSS hingegen um 0,12V zu senken ( $4\text{mV} * 6\text{Zellen} * 5^\circ\text{C}=0,12\text{V}$ ).

## 5.5 Das Ladeverfahren des LiPo-Akkus

## Aufgabe

Laden Sie den LiPo-Akku mithilfe des ChargerModuls.

## Aufbau



## Benötigte Geräte

- 1 Grundeinheit
- 1 ChargerModul
- 1 LiPo-Akku
- 1 AV-Modul
- 1 Laborkabel

## Durchführung

1. Bauen Sie den Versuch entsprechend dem Schaltplan auf. Verwenden Sie das ChargerModul im LiPo-Modus. Hinweise zur Handhabung des ChargerModuls finden Sie auf Seite 42. Schalten Sie den Charger noch nicht ein.
2. Messen und erfassen Sie die Leerlaufspannung  $U_0$  des LiPo-Moduls.

**Hinweis:** Das Akku-Modul sollte zu Beginn des Versuchs maximal zu etwa 75% Prozent geladen sein (dies entspricht einer Leerlaufspannung von etwa 3,9V). Zum Entladen kann der Akku mit Hilfe der Widerstände auf den gewünschten Ladezustand gebracht werden. Falls der Ladezustand unterhalb von 75% liegt, dauert der Versuch einfach entsprechend länger.

3. Nehmen Sie den Ladevorgang auf, indem Sie bis zum Abbruch des Ladeprogramms in Abständen von 1min die Spannung  $U$  und Stromstärke  $I$  am Akkumodul erfassen. Das AV-Modul wird dazu im Strom-Spannungsmodus betrieben.

## Auswertung

1. Tragen Sie Ihre Messwerte in das Diagramm ein.
2. Beschreiben und begründen Sie das Verhalten von Strom und Spannung während des Ladevorgangs.
3. Bestimmen Sie die Zeit  $t_c$ , nach welcher der Wechsel zwischen dem CC-Modus (Constant Current) und dem CV-Modus (Constant Voltage) stattfindet.
4. Erklären Sie, weshalb bei Lithium-basierten Akku-Typen kein ausschließliches CC-Ladeverfahren angewendet werden sollte.



## 5.5 Das Ladeverfahren des LiPo-Akkus

## Messwerte

$$U_0(1) = 3,80V$$

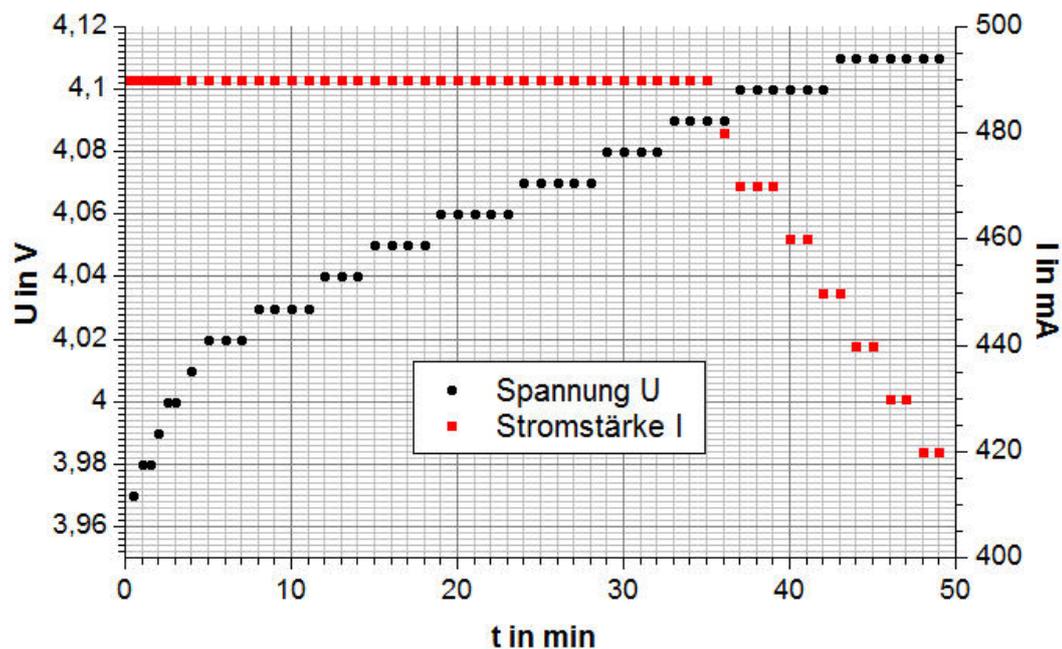
t in min	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	4	5	6	7	8	9	10
U in V	3,95	3,97	3,98	3,98	3,99	4,00	4,00	4,01	4,02	4,02	4,02	4,03	4,03	4,03
I in mA	490	490	490	490	490	490	490	490	490	490	490	490	490	490

t in min	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
U in V	4,03	4,04	4,04	4,04	4,05	4,05	4,05	4,05	4,06	4,06	4,06	4,06	4,06	4,07
I in mA	490	490	490	490	490	490	490	490	490	490	490	490	490	490

t in min	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38
U in V	4,07	4,07	4,07	4,07	4,08	4,08	4,08	4,08	4,09	4,09	4,09	4,09	4,10	4,10
I in mA	490	490	490	490	490	490	490	490	490	490	490	480	470	470

t in min	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	55	60
U in V	4,10	4,10	4,10	4,10	4,11	4,11	4,11	4,11	4,11	4,11	4,11	4,11	4,12	4,12
I in mA	470	460	460	450	450	440	440	430	430	420	420	410	390	370

## Diagramme





## 5.5 Das Ladeverfahren des LiPo-Akkus

### Auswertung

2.

Beim Laden des LiPo-Akkus wird ein CC-CV-Verfahren angewendet. Der Ladeprozess beginnt mit dem CC-Verfahren, bei dem die Stromstärke konstant bleibt. In diesem Bereich steigt die Spannung an bis auf ca. 4,1V. Wenn die Schwellspannung erreicht ist, erfolgt der Wechsel in den CV-Modus (**C**onstant **V**oltage). Im CV-Modus bleibt die Spannung nahezu konstant und die Stromstärke sinkt bis zum Abbruch des Ladeprogramms.

3.  $t_c=35\text{min}$

4.

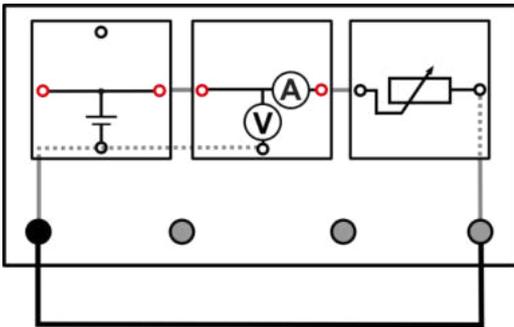
Die Gefahr beim Laden im CC-Modus besteht prinzipiell darin, dass der Akku überladen wird, wenn der Ladevorgang nicht rechtzeitig beendet wird. Für Lithium-basierte Akkus ist dies besonders kritisch, da sie sehr unverträglich auf Überladung reagieren. Schon geringe Überladungen können eine Druckerhöhung innerhalb der Zelle bewirken, was bei dauerhafter Überladung sogar zum Platzen und Verbrennen der Zelle führen kann.

## 5.6 Das Entladeverfahren eines Akkumoduls

### Aufgabe

Untersuchen Sie das Entladeverhalten eines Akkumoduls.

### Aufbau



### Benötigte Geräte

- 1 Grundeinheit
- 1 Akkumodul NiMH, einfach
- 1 Potentiometermodul
- 1 AV-Modul
- 1 Laborkabel

### Durchführung

1. Bauen Sie den Versuch entsprechend dem Schaltplan auf. Stecken Sie das Potentiometer noch nicht ein, damit das Experiment nicht ohne Aufnahme der Messwerte startet.
2. Messen Sie zunächst die Leerlaufspannung des Akku-Moduls  $U_0(1)$  und notieren Sie den Wert.
3. Stecken Sie das Potentiometer auf die Grundeinheit und regeln Sie den Widerstand so, dass ein Entladestrom von 250mA fließt. Das AV-Modul wird im Strom-Spannungs-Modus betrieben.
4. Messen Sie anschließend zehn Minuten lang in Abständen von einer Minute die Spannung  $U$  und den Strom  $I$ . Regeln Sie gegebenenfalls den Widerstand am Potentiometer nach, um den Entladestrom konstant zu halten. Tragen Sie ihre Messwerte in die Tabelle ein. Entfernen Sie nach Beendigung des Versuchs das Kabel von der Grundeinheit.
5. Messen Sie fünf Minuten nach Beendigung des Experiments erneut die Leerlaufspannung  $U_0(2)$ .

**Hinweis:** Das Akku-Modul sollte vor Beginn des Versuchs zu mindestens 75% geladen sein (entspricht einer Leerlaufspannung von etwa 1,26V).

### Messwerte

$$U_0(1) = 1,29V$$

$$U_0(2) = 1,19V$$

t in min	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
U in V	1,26	1,23	1,21	1,19	1,18	1,17	1,16	1,15	1,14	1,13	1,12

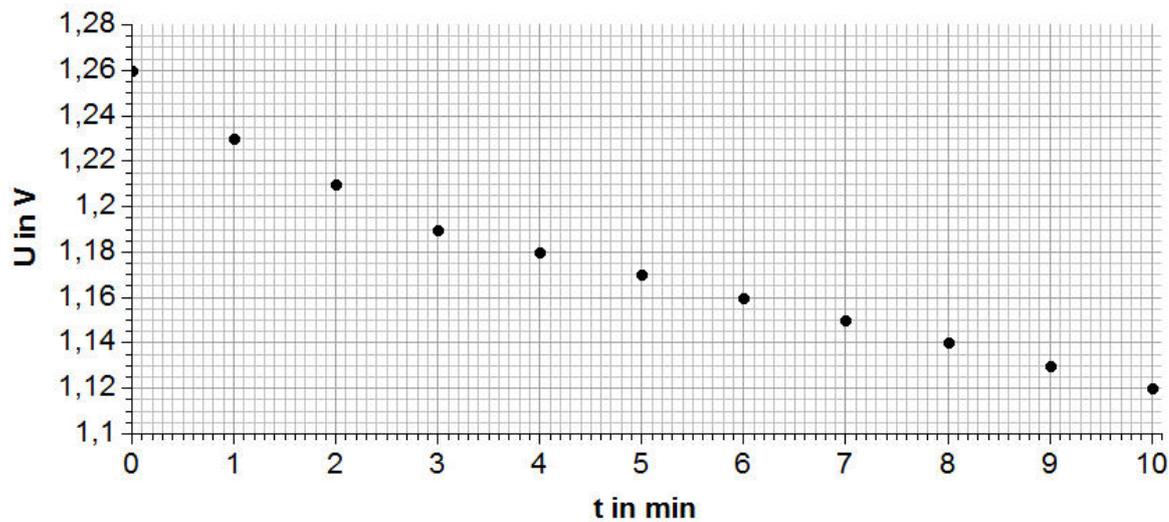
### Auswertung

1. Tragen Sie Ihre Messwerte in das Diagramm ein.
2. Berechnen Sie die Kapazität des Akkumoduls zu Beginn und nach Beendigung des Experiments mithilfe der Leerlaufspannung. Hinweise dazu finden Sie im Versuch „Die Nennspannung und Kapazität von Spannungsquellen“.
3. Benennen Sie Ursachen einer Tiefentladung von Akkus und Schutzmöglichkeiten.



## 5.6 Das Entladeverfahren eines Akkumoduls

## Diagramme



## Auswertung

2.

1) Ladezustand zu Beginn: $U_0(1)=1,29V$ entspricht 83% Restladung
Restkapazität zu Beginn:
$\frac{x}{600mAh} = \frac{83}{100} \rightarrow x = \underline{\underline{498mAh}}$
2) Ladezustand nach dem Versuch: $U_0(2)=1,19V$ entspricht 54% Restladung
Restkapazität nach dem Versuch:
$\frac{x}{600mAh} = \frac{54}{100} \rightarrow x = \underline{\underline{324mAh}}$

3.

Ursachen für die Tiefentladung gibt es vielzählige. So kann zum Beispiel die Überalterung oder falsche Aufladung von Akkus zur Tiefentladung führen. Auch ein defektes oder nicht passendes Ladegerät sind gefährlich für den Akku. Bei Anwendung eines Verbrauchers kann eine passive Stromentnahme oder das nicht rechtzeitige Abschalten der Last eine Tiefentladung bewirken.

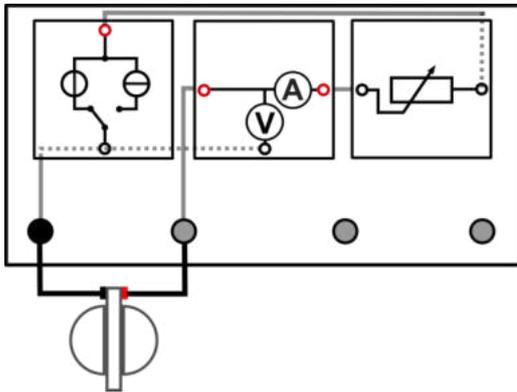
Vorbeugen kann man der Tiefentladung durch einen sogenannten Tiefentladeschutz. Dieser schaltet den Verbraucher ab, sobald ein festgelegter Ladezustand unterschritten wird. In Fahrzeugen werden sogenannte „Lastabwurfrelais“ verwendet, um den Verbraucher abzuschalten.

## 6.1 Die Wasserstoffproduktion der reversiblen Brennstoffzelle

### Aufgabe

Untersuchen Sie die Wasserstoffproduktion einer reversiblen Brennstoffzelle.

### Aufbau



### Benötigte Geräte

- 1 Grundeinheit
- 1 reversible Brennstoffzelle
- 1 ChargerModul
- 1 AV-Modul
- 1 Potentiometermodul
- 2 Laborkabel

### Durchführung

1. Befüllen Sie die Brennstoffzelle mit destilliertem Wasser. Hinweise zur Handhabung der reversiblen Brennstoffzelle finden Sie auf Seite 48.
2. Bauen Sie den Versuch entsprechend dem Schaltplan auf. Achten Sie auf die Polarität der Anschlüsse.
3. Das ChargerModul wird um 90° gedreht auf die Grundeinheit aufgesteckt (siehe Skizze) und im Elektrolyseur-Modus („Electrolyzer“) betrieben. Hinweise zur Nutzung finden Sie auf Seite 42.
4. Stellen Sie zunächst am Potentiometer einen Widerstand von  $2\Omega$  ein und messen Sie Strom  $I$  und Spannung  $U$  an der Brennstoffzelle. Das AV-Modul wird im Strom-Spannungs-Modus betrieben.
5. Wiederholen Sie das Experiment mit verschiedenen Widerständen (siehe Tabelle) und erfassen Sie jeweils die Zeit, welche zur Produktion von 3 ml Wasserstoff ( $H_2$ ) benötigt wird. Tragen Sie alle Werte in die Tabelle ein.

**Hinweis:** Achten Sie beim Aufbau darauf, dass der Stromkreis vor Beginn jeder Teilmessung geöffnet ist (zum Beispiel durch Entfernen eines Kabels), damit das Experiment nicht ohne die Aufnahme der Messwerte beginnt.

### Auswertung

1. Tragen Sie Ihre Messwerte in das Diagramm ein.
2. Beschreiben Sie Ihre Messwerte und den Zusammenhang zwischen Stromstärke und Wasserstoffproduktion.
3. Erklären Sie weshalb die Spannung nahezu konstant bleibt, während die Stromstärke mit höherem Widerstand sinkt.

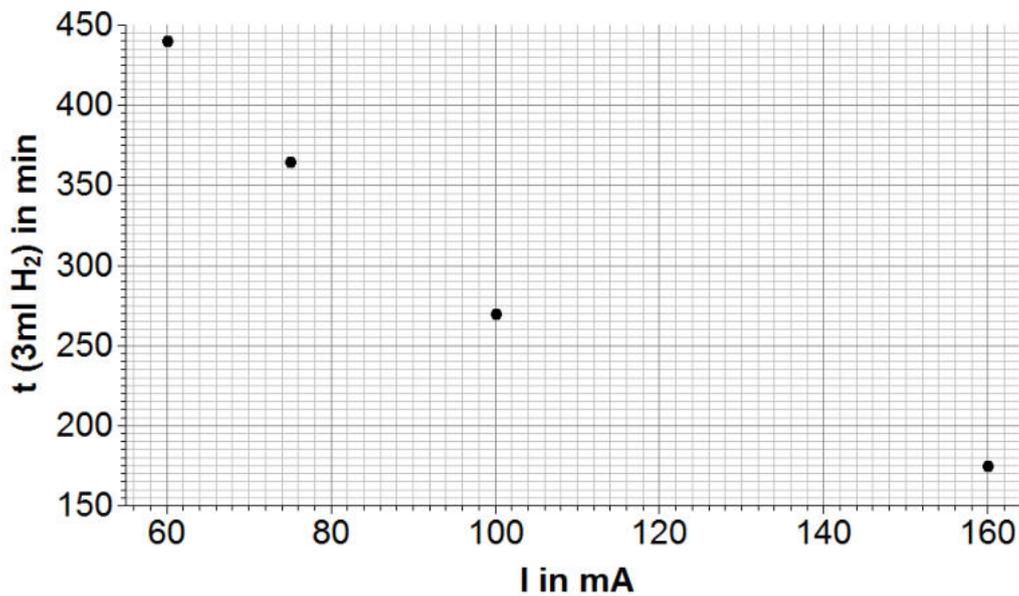
### Messwerte

R in $\Omega$	2	4	6	8
U in V	1,58	1,56	1,55	1,54
I in mA	160	100	75	60
Zeit (3ml $H_2$ ) in min	175	270	365	440



## 6.1 Die Wasserstoffproduktion der reversiblen Brennstoffzelle

## Diagramme



## Auswertung

2.

• Unterschiedliche Stromstärken und Zeitdauern, bis 3ml Wasserstoff erzeugt sind. Die Spannung bleibt jedoch nahezu konstant.

• Je kleiner der Lastwiderstand, desto größer die Stromstärke und desto schneller geht die Produktion von Wasserstoff vonstatten.

3.

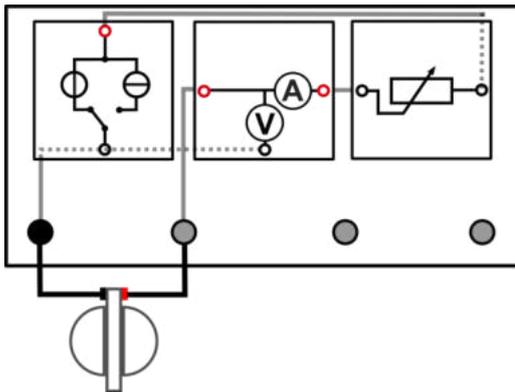
Dieses Verhalten hängt mit der Kennlinie des Elektrolyseurs zusammen (bei der Produktion von Wasserstoff wird die reversible Brennstoffzelle als Elektrolyseur betrieben). Hinweise zur Kennlinie finden Sie im Versuch „Die Kennlinie des Elektrolyseurs“.

## 6.2 Die Kennlinie des Elektrolyseurs

### Aufgabe

Verwenden Sie die reversible Brennstoffzelle als Elektrolyseur und nehmen Sie die zugehörige Kennlinie auf.

### Aufbau



### Benötigte Geräte

- 1 Grundeinheit
- 1 reversible Brennstoffzelle
- 1 ChargerModul
- 1 AV-Modul
- 1 Potentiometermodul
- 2 Laborkabel

### Durchführung

1. Befüllen Sie die Brennstoffzelle mit destilliertem Wasser. Hinweise zur Handhabung der reversiblen Brennstoffzelle finden Sie auf Seite 48.
2. Bauen Sie den Versuch entsprechend dem Schaltplan auf. Achten Sie auf die Polarität der Anschlüsse.
3. Das ChargerModul wird um 90° gedreht auf die Grundeinheit aufgesteckt (siehe Skizze) und im Festspannungsmodus mit 3V betrieben. Hinweise zur Nutzung finden Sie auf Seite 42.
4. Stellen Sie zunächst am Potentiometer den maximalen Widerstand von 110Ω ein und messen Sie Strom  $I$  und Spannung  $U$  an der Brennstoffzelle. Das AV-Modul wird im Strom-Spannungs-Modus betrieben.
5. Verringern Sie nun in mehreren Schritten den Widerstand am Potentiometer und nehmen Sie jeweils Strom und Spannung auf. Tragen Sie Ihre Werte in die Tabelle ein.

**Hinweis:** Achten Sie beim Aufbau darauf, dass der Stromkreis vor Beginn der Messung geöffnet ist (zum Beispiel durch Entfernen eines Kurzschlusssteckers), damit das Experiment nicht ohne die Aufnahme der Messwerte beginnt.

### Messwerte

U in V	1,49	1,50	1,51	1,52	1,53	1,54	1,55	1,56
I in mA	13	18	22	33	45	60	76	100

U in V	1,57	1,58	1,59	1,60	1,61	1,62	1,63	1,64
I in mA	114	145	173	193	226	263	305	365

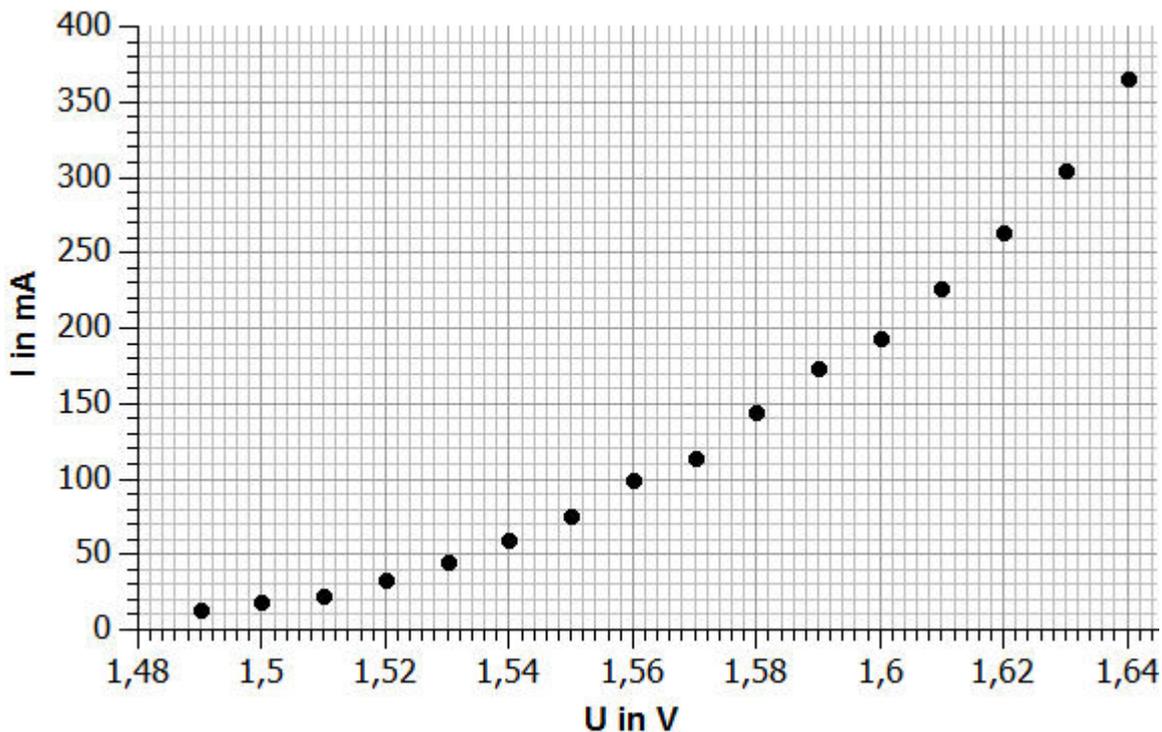


## 6.2 Kennlinie des Elektrolyseurs

## Auswertung

1. Tragen Sie Ihre Werte in das abgebildete Diagramm ein.
2. Interpretieren Sie die U-I Kennlinie des Elektrolyseurs.

## Diagramme



## Auswertung

2.

Aus der Kennlinie ist deutlich zu erkennen, dass erst ab einer bestimmten Spannung ein Strom fließt, der zur Erzeugung der Gase führt. Die Zellspannung der galvanischen Zelle beträgt 1,23V und diese sogenannte Zersetzungsspannung muss mindestens angelegt werden, um Wasser zu zersetzen. Die gemessene Mindestspannung von ca. 1,49 V ist jedoch höher. Die Differenz von experimenteller und theoretischer Zersetzungsspannung heißt Überspannung.

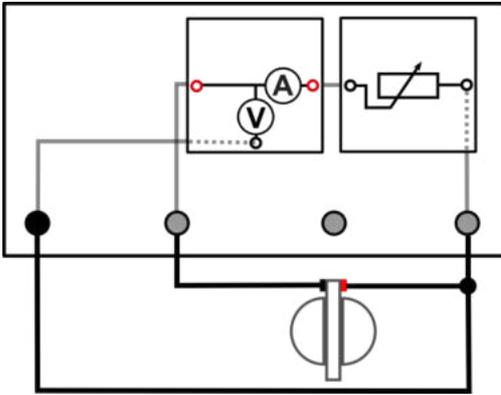
Die Überspannung ist abhängig von der Art des Elektrodenmaterials, von der Oberflächenbeschaffenheit der Elektroden, von der Art und Konzentration des Elektrolyten sowie von der Stromdichte (Stromstärke pro Fläche) und der Temperatur. Überspannungen sind gering bei Elektrodenreaktionen die zur Abscheidung von Metallen führen, jedoch besonders groß, wenn Gase ( $H_2$ ,  $O_2$ ,  $Cl_2$ ) abgeschieden werden.

## 6.3 Der Wasserstoffverbrauch einer Brennstoffzelle

### Aufgabe

Untersuchen Sie den Wasserstoffverbrauch einer Brennstoffzelle.

### Aufbau



### Benötigte Geräte

- 1 Grundeinheit
- 1 reversible Brennstoffzelle
- 1 Potentiometermodul
- 1 AV-Modul
- 3 Laborkabel

### Durchführung

1. Vor dem Betrieb der Brennstoffzelle muss diese zunächst mit ca. 8ml Wasserstoff befüllt werden. Hinweise dazu finden Sie im Versuch „Die Wasserstoffproduktion der Brennstoffzelle“.
2. Bauen Sie den Versuch entsprechend dem Schaltplan auf.
3. Betreiben Sie die Brennstoffzelle im ersten Teilversuch bei einem Potentiometerwiderstand von  $R=4\Omega$ . Nehmen Sie während des Betriebs in Abständen von einer Minute jeweils Spannung  $U$ , Stromstärke  $I$  und den Wasserstoffverbrauch auf. Das AV-Modul wird dazu im Strom-Spannungs-Modus betrieben.
4. Füllen Sie die Brennstoffzelle zunächst wieder auf (mit etwa 12ml  $H_2$ ) und betreiben Sie diese anschließend bei einem Potentiometerwiderstand von  $R=2,0\Omega$ . Nehmen Sie während des Betriebs in Abständen von einer Minute jeweils Spannung  $U$ , Stromstärke  $I$  und den Wasserstoffverbrauch auf.

### Auswertung

1. Tragen Sie Ihre Werte in das Diagramm ein.
2. Beschreiben Sie das Verhalten von Stromstärke, Spannung und Wasserstoffverbrauch der Brennstoffzelle während des Experiments.
3. Erläutern Sie den Einfluss des Lastwiderstands des Potentiometers auf den Betrieb der Brennstoffzelle.

### Messwerte

**$R=4\ \Omega$**

t in min	1	2	3	4	5
U in V	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72
I in mA	190	190	190	190	190
H <sub>2</sub> in ml	1	2	3	4	5



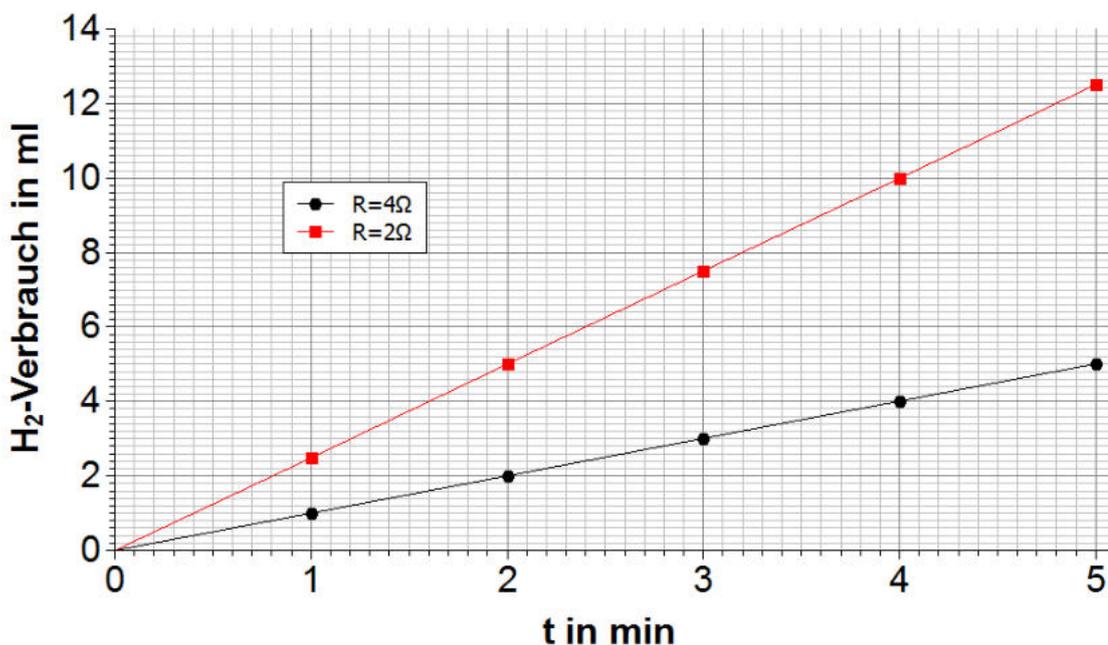
## 6.3 Der Wasserstoffverbrauch einer Brennstoffzelle

## Messwerte

 $R=2,0\Omega$ 

t in min	1	2	3	4	5
U in V	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74
I in mA	290	290	290	290	290
H <sub>2</sub> in ml	2,5	5	7,5	10	12,5

## Diagramme



## Auswertung

2.

Stromstärke und Spannung bleiben nahezu konstant. Der Wasserstoffverbrauch steigt mit der Zeit an, ein linearer Zusammenhang ist zu beobachten. Der Anstieg der Geraden (H<sub>2</sub>-Verbrauch in Abhängigkeit von der Zeit) ist abhängig vom Laststrom (größerer Anstieg bei höherem Laststrom).

3.

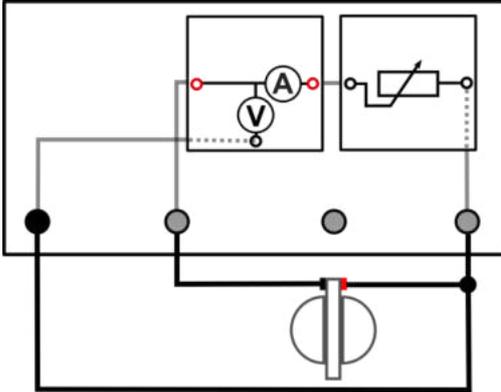
Bei kleinerem Lastwiderstand fließen höhere Stromstärken und der Wasserstoff wird schneller verbraucht. In beiden Fällen ist ein linearer Anstieg des Wasserstoffverbrauchs mit der Zeit beobachtbar.

## 6.4 Die Kennlinie der Brennstoffzelle

### Aufgabe

Ermitteln Sie die U-I-Kennlinie einer Brennstoffzelle.

### Aufbau



### Benötigte Geräte

- 1 Grundeinheit
- 1 reversible Brennstoffzelle
- 1 Potentiometermodul
- 1 AV-Modul
- 3 Laborkabel

### Vorbereitung

Bevor Sie mit dem Versuch starten, müssen Sie mit der reversiblen Brennstoffzelle ca. 10 ml Wasserstoff produzieren (siehe Versuch „Die Wasserstoffproduktion der Brennstoffzelle“). Die Zelle erzeugt während des Ladens einen kapazitiven Effekt, welcher vor der Messung abgebaut werden muss. Berücksichtigen Sie deshalb, dass die reversible Brennstoffzelle vor dem Messvorgang kurz (ca. 20 Sekunden bei  $10\Omega$ ) entladen werden muss. Die für das Experiment notwendige Leerlaufspannung liegt zwischen  $0,8\text{V} - 0,9\text{V}$ .

### Durchführung

1. Bauen Sie den Versuch entsprechend dem Schaltplan auf. Stecken Sie das Potentiometer noch nicht auf.
2. Messen Sie zunächst die Leerlaufspannung der Brennstoffzelle  $U_0$  und tragen Sie Ihre Messwerte in die Tabelle ein.
3. Stecken Sie das Potentiometer auf und stellen Sie den maximalen Widerstand von  $110\Omega$  ein. Messen Sie anschließend die Spannung  $U$  und den Strom  $I$ . Das AV-Modul wird im Strom-Spannungs-Modus betrieben.
4. Verringern Sie nun in mehreren Schritten den Widerstand am Potentiometer und messen Sie jeweils Strom  $I$  und Spannung  $U$  an der Brennstoffzelle.

### Auswertung

1. Stellen Sie Ihre Messwerte im beigefügten Diagramm dar.
2. Beschreiben Sie den Verlauf der U-I-Kennlinie.
3. Erläutern Sie, welcher Bereich der Kennlinie für den Betrieb eines Verbrauchers genutzt werden sollte.
4. Erklären Sie, weshalb die Spannung mit höherer Stromstärke absinkt.



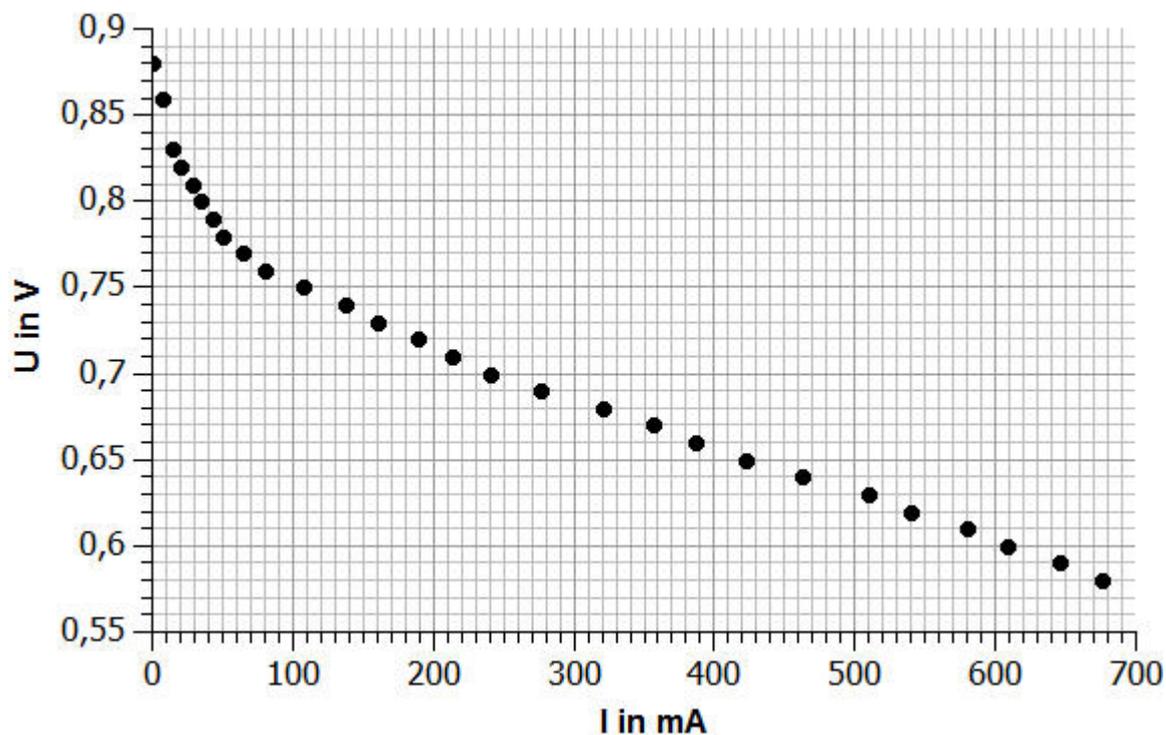
## 6.4 Die Kennlinie der Brennstoffzelle

## Messwerte

U in V	0,88	0,86	0,83	0,82	0,81	0,8	0,79	0,78	0,77	0,76	0,75	0,74	0,73	0,72
I in mA	0	7	15	20	28	35	43	50	65	80	107	137	160	189

U in V	0,71	0,70	0,69	0,68	0,67	0,66	0,65	0,64	0,63	0,62	0,61	0,60	0,59	0,58
I in mA	213	240	276	321	357	387	422	463	510	540	580	609	645	675

## Diagramm



## Auswertung

2.

Der erste Teil der U-I-Kennlinie fällt steil ab. Anschließend verläuft die Kennlinie flacher. Der Zusammenhang zwischen Strom und Spannung kann in diesem Bereich als linear angesehen werden.

Die maximal erreichbare Spannung der hier verwendeten PEM-Brennstoffzelle liegt bei etwa 0,9V.



## 6.4 Die Kennlinie der Brennstoffzelle

### Auswertung

3.

Der erste Teil der Kennlinie fällt steil ab. Die Spannung sinkt also bei geringen Stromstärken stark ab. Das ist ein charakteristisches Merkmal einer PEM-Brennstoffzelle.

Mit steigender Stromstärke verläuft der Spannungsabfall flacher. Deshalb sollte die Betriebsspannung der Brennstoffzelle in diesem Bereich liegen.

4.

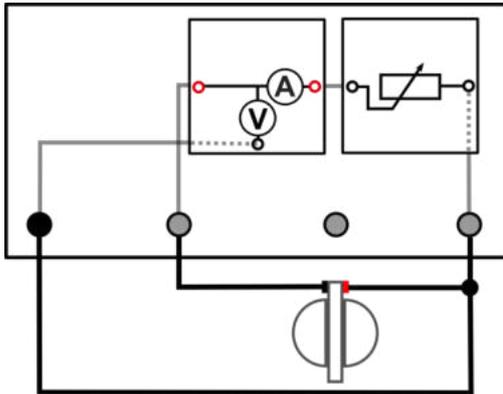
Im Leerlauf fließt kein Strom, wenn allerdings ein Widerstand dazu geschaltet wird, beginnt der Elektronenfluss. Dabei werden an der Anode der Brennstoffzelle Wassermoleküle in Protonen und Elektronen gespalten. Es wandern nun weniger Elektronen durch den Stromkreis als Protonen durch die Membran. Dadurch gelangen an die Kathode mehr Protonen als Elektronen pro Zeiteinheit. Dadurch bedingt folgt eine Änderung der Elektronenpotentiale. Die Potentialdifferenz sinkt und damit die Gesamtspannung der Zelle.

## 6.5 Der Wirkungsgrad der Brennstoffzelle

### Aufgabe

Ermitteln Sie den Wirkungsgrad der reversiblen Brennstoffzelle

### Aufbau



### Benötigte Geräte

- 1 Grundeinheit
- 1 reversible Brennstoffzelle
- 1 Potentiometermodul
- 1 AV-Modul
- 3 Laborkabel

### Vorbereitung

Bevor Sie mit dem Versuch starten, müssen Sie mit der reversiblen Brennstoffzelle ca. 5 ml Wasserstoff produzieren (siehe Versuch „Die Wasserstoffproduktion der Brennstoffzelle“). Die Zelle erzeugt während des Ladens einen kapazitiven Effekt, welcher vor der Messung abgebaut werden muss. Berücksichtigen Sie deshalb, dass die reversible Brennstoffzelle vor dem Messvorgang kurz (ca. 20 Sekunden bei  $10\Omega$ ) entladen werden muss. Die für das Experiment notwendige Leerlaufspannung liegt zwischen  $0,8V - 0,9 V$ .

### Durchführung

1. Bauen Sie den Versuch entsprechend dem Schaltplan auf.
2. Stellen Sie am Potentiometer einen Widerstand von  $5\Omega$  ein. Messen Sie anschließend die Spannung  $U$  und den Strom  $I$ . Das AV-Modul wird im Strom-Spannungs-Modus betrieben.
3. Messen Sie die Zeit, innerhalb der 2ml Wasserstoff verbraucht werden.

### Messwerte

$$U = 0,73V$$

$$I = 137,8mA$$

$$t = 2min$$



## 6.5 Der Wirkungsgrad der Brennstoffzelle

## Auswertung

1. Berechnen Sie die elektrische Energie, welche während des Versuchs verbraucht wurde. Die elektrische Energie wird berechnet mithilfe folgender Formel:

$$W_2 = U \cdot I \cdot t$$

2. Berechnen Sie, wie lange sich der Motor mit einer kompletten H<sub>2</sub>-Füllung (12 ml) drehen würde.
3. Bestimmen Sie den Wirkungsgrad der reversiblen Brennstoffzelle. Der Wirkungsgrad der reversiblen Brennstoffzelle wird über folgende Formel bestimmt :

$$\eta = \frac{W_2}{W_1}$$

(Der untere Brennwert von 2ml H<sub>2</sub> beträgt W<sub>1</sub>= 22 Ws)

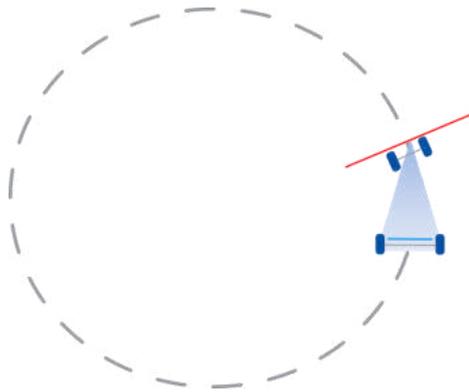
1.	$W_2 = U \cdot I \cdot t = 0,73V \cdot 0,138A \cdot 2 \cdot 60s = 12,1Ws$
2.	$t = 2min \cdot 6 = 12min$
3.	$\eta = \frac{W_2}{W_1} = \frac{12,1Ws}{22Ws} = 0,55 \approx 55\%$

## 7.1 Betrieb des Elektroautos mit verschiedenen Akkumodulen

### Aufgabe

Beobachten Sie das Fahrverhalten des Autos mit verschiedenen Akkumodulen und schließen Sie auf deren Eigenschaften.

### Aufbau



### Benötigte Geräte

- Elektroauto mit Modulplatte
- 1 AV-Modul
- Bleiakкумулятор
- NiZn-Akkumodul
- NiMh-Akkumodul (einfach)
- LiFePo-Akkumodul
- LiPo-Akkumodul
- Kondensatormodul
- Stoppuhr

### Vorbereitung

Sie benötigen für den Versuch ausreichend Platz (mind. 2x2m). Kippen Sie die Vorderachse des Autos nach links, damit beim Fahren eine Kreisbahn entsteht. Markieren Sie die Start-/Ziellinie des Autos auf der Kreisbahn mit einem Klebeband oder ähnlichem. Die Akkumodule sollten ausreichend geladen sein. Das Kondensatormodul sollte direkt vor der Versuchsdurchführung mithilfe des ChargerModuls auf etwa 5V geladen werden. Hinweise dazu finden Sie in den Akku-Ladeversuchen und im Versuch „Das Ladeverhalten des Kondensators“.

### Durchführung

Führen Sie für jedes Akkumodul folgende Anweisungen aus:

1. Messen Sie zuerst die Leerlaufspannung des Akkumoduls  $U_0$  und tragen Sie Ihren Messwert in die Tabelle ein.
2. Bringen Sie das Akkumodul auf die Steckplatte des Autos auf und verbinden Sie zunächst ein Kabel.
3. Bringen Sie das Auto an die Startlinie und verbinden Sie kurz vor dem Absetzen das zweite Kabel.
4. Messen Sie die Zeit, die das Auto für 4 Umrunden benötigt und führen Sie die Messung mehrmals hintereinander durch ohne das Auto anzuhalten. Tragen Sie die Werte in die Tabelle ein.
5. Lassen Sie das Auto mind. 5 min fahren und notieren Sie ihre Beobachtung.
6. Berechnen Sie die Differenz zur vorherigen Runde, um die Zeit für 4 Runden festzustellen.

**Hinweis:** Achten Sie bei dem Versuch unbedingt darauf, dass das Auto nirgends anstößt, da die Achsen ansonsten beschädigt werden könnten. Halten Sie das Auto vor dem Losfahren einen kurzen Moment fest, da es kippen könnte.

*Hinweis für Lehrer: Das Auto fährt mit dem LiPo-Akkumodul auf glattem Boden nicht zuverlässig, da die Geschwindigkeit zu hoch ist und es kippt. Wenn möglich, sollte der Versuch auf Teppichboden durchgeführt werden.*



## 7.1 Betrieb des Elektroautos mit verschiedenen Akkumodulen

## Auswertung

1. Vergleichen Sie die Akkumulatoren untereinander und begründen Sie die Unterschiede.
2. Benennen Sie Faktoren, die die Messung beeinflussen.
3. Schlussfolgern Sie, welcher Akkumulator für den Betrieb eines Elektroautos geeignet ist.
4. Erläutern Sie, weshalb der Kondensator nicht mit mehr als 5V aufgeladen werden sollte, um ein sinnvolles Ergebnis zu erhalten.

## Messwerte

	4 Runden	8 Runden	12 Runden	16 Runden	20 Runden	Beobachtung nach 5 min (bzw. Zeit nach der das Auto stoppt)
--	----------	----------	-----------	-----------	-----------	---

**Bleiakkumodul:  $U_0 = 2,05V$** 

Zeit in s	13	26	39	52	65	Konstante Geschwindigkeit
Zeit für 4 Runden	13	13	13	13	13	

**NiZn-Akkumodul:  $U_0 = 1,84V$** 

Zeit in s	14	28	42	56	70	Konstante Geschwindigkeit
Zeit für 4 Runden	14	14	14	14	14	

**NiMH-Akkumodul:  $U_0 = 1,38$** 

Zeit in s	18,6	38,6	58,9	79,6	100,6	Leichte Geschwindigkeitsabnahme, aber stoppt nicht
Zeit für 4 Runden	18,6	20	20,3	20,7	21	

**LiFePo-Akkumodul:  $U_0 = 3,23V$** 

Zeit in s	8,6	17,3	26,1	34,8	43,7	Wird langsamer, aber kommt nicht zum Stehen
Zeit für 4 Runden	8,6	8,7	8,8	8,7	8,9	

**LiPo-Akkumodul:  $U_0 = 3,83V$** 

Zeit in s	0,9	0,8	0,72	0,70	0,66	Konstante Geschwindigkeit, sehr schnell
Zeit für 4 Runden	8,2	8,1	8,2	8,3	8,2	

**Kondensatormodul:  $U_0 = 5V$  (möglichst 5V)**

Zeit in s	8,5	20,5	0	0	0	Stoppt nach 35 s
Zeit für 4 Runden	8,5	12	0	0	0	



## 7.1 Betrieb des Elektroautos mit verschiedenen Akkumodulen

### Auswertung

1.

Höhere Geschwindigkeit → höhere Betriebs- bzw Nennspannung

---

LiPo am höchsten mit  $U_{\max} = 4,2V$  und NiMH am niedrigsten mit  $U_{\max} = 1,35V$

---

Kondensator entlädt sich sehr schnell und verliert beständig an Betriebsspannung → andere

---

Akkumulatoren haben größere Kapazität...

---

NiZn hat ebenfalls eine kleinere Kapazität als die anderen Akkumulatoren

---

2.

Bodenbeschaffenheit

---

Gewicht des Akkus (Bleiakku sehr schwer)

---

Luftwiderstand

---

Auto fährt nicht immer die gleiche Kreisbahn

---

3.

LiPo hält lange und lässt Elektroauto sehr schnell fahren(hohe Nennspannung)

---

NiMH langsamer aber kontinuierlich

---

4.

Bei zu hoher Geschwindigkeit (höherer Spannung) könnte das Auto kippen und/oder aus Bahn kommen.

---

(maximale Betriebsspannung könnte überschritten werden)

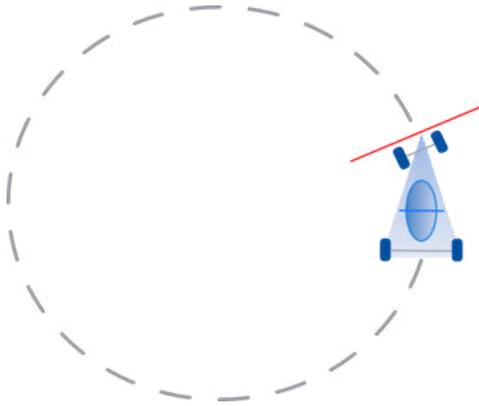
---

## 7.2 Betrieb des Elektroautos mit einer Brennstoffzelle

### Aufgabe

Beobachten Sie das Fahrverhalten des Autos mit einer Brennstoffzelle und schließen Sie auf deren Eigenschaften.

### Aufbau



### Benötigte Geräte

- 1 Automodul
- 1 Grundeinheit
- 1 reversible Brennstoffzelle
- 1 ChargerModul
- 1 AV-Modul
- 1 Potentiometermodul
- 2 Laborkabel

*Zusätzlich benötigt:*

- Stoppuhr

### Vorbereitung

Sie benötigen für den Versuch ausreichend Platz (mind. 2x2m). Kippen Sie die Vorderachse des Autos nach links, damit beim Fahren eine Kreisbahn entsteht. Markieren Sie die Start-/Ziellinie des Autos auf der Kreisbahn mit einem Klebeband oder ähnlichem. Produzieren Sie mit der reversiblen Brennstoffzelle 12 ml Wasserstoff (siehe Experiment „Wasserstoffproduktion mit der reversiblen Brennstoffzelle“).

### Durchführung

1. Messen Sie die Leerlaufspannung der Brennstoffzelle  $U_0$  nach der Produktion von 12ml Wasserstoff und tragen Sie den Wert in die Tabelle ein. Das AV-Modul wird dazu im Spannungsmodus betrieben.
2. Setzen Sie die Brennstoffzelle auf das Auto und verbinden Sie zunächst ein Kabel.
3. Bringen Sie das Auto an die Startlinie und verbinden Sie kurz vor dem Absetzen das zweite Kabel.
4. Messen Sie die Zeit, die das Auto für 4 Umrunden benötigt und führen Sie die Messung mehrmals hintereinander durch, ohne das Auto anzuhalten. Tragen Sie die Werte in die Tabelle ein.
5. Lassen Sie das Auto mind. 5 min fahren und notieren Sie ihre Beobachtung.
6. Berechnen Sie die Differenz zur vorherigen Runde um die Zeit für 4 Runden festzustellen.

**Hinweis:** Achten Sie bei dem Versuch unbedingt darauf, dass das Auto nirgends anstößt, da die Achsen ansonsten beschädigt werden könnten. Halten Sie das Auto vor dem Losfahren einen kurzen Moment fest, da es kippen könnte.



## 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)