



EUROPA-FACHBUCHREIHE  
für Kraftfahrzeugtechnik

# Fachwissen E-Bike

Technik der Leicht-Elektrofahrzeuge

**3. Auflage**

Verlag Europa-Lehrmittel · Nourney, Vollmer GmbH & Co. KG  
Düsseldorfer Straße 23 · 42781 Haan-Gruiten

**Europa-Nr.: 24015**

## Autoren

---

Dipl.-Ing. Michael Gressmann	Borken (He)
Dipl.-Ing. Ludwig Retzbach	Riederich

## Bildbearbeitung

---

Zeichenbüro des Verlags Europa-Lehrmittel, 73760 Ostfildern  
Grafische Produktionen Jürgen Neumann, 97222 Rimpar

Das vorliegende Buch richtet sich selbstverständlich an Mechanikerinnen und Mechaniker – allerdings haben die Autoren aus Gründen der besseren Lesbarkeit die männliche Form gewählt.

Der Verlag und die Autoren bedanken sich bei Herrn Eberhard Müller, dem Lektor und Mitautor der ersten und zweiten Auflage „Fachwissen E-Bike“. Weiterer Dank für Text- und Bildbeiträge gebührt den Herren Ernst Brust und Carsten Bielmeier von der Fa. velotech.de (Schweinfurt).

3. Auflage 2018, korrigierter Nachdruck 2019

Druck 5 4 3 2

Alle Drucke derselben Auflage sind parallel einsetzbar, da sie bis auf die Behebung von Druckfehlern untereinander unverändert sind.

ISBN 978-3-8085-2413-8

Alle Rechte vorbehalten. Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der gesetzlich geregelten Fälle muss vom Verlag schriftlich genehmigt werden.

© 2018 by Verlag Europa-Lehrmittel, Nourney, Vollmer GmbH & Co. KG, 42781 Haan-Gruiten  
<http://www.europa-lehrmittel.de>

Satz und Layout: Grafische Produktionen Jürgen Neumann, 97222 Rimpar

Umschlag: braunwerbeagentur, 42477 Radevormwald

Umschlagfoto: © Markus Mainka – Stock.adobe.com

Druck: RCOM print GmbH, 97222 Würzburg-Rimpar

Die Zeit scheint reif für Elektrofahrzeuge. Doch während das Elektroauto noch mit Kosten- und Reichweitenproblemen kämpft, hat sich das Elektrofahrrad längst schon durchsetzen können. Laut Statistik wurden im Jahr 2016 in Deutschland 605 000 Elektrofahrräder verkauft – mehr als das Vierfache der Absatzzahl im Jahr 2009. Dies hat leicht nachvollziehbare Gründe, denn das E-Fahrrad stellt ein geradezu ideales Personenbeförderungsmittel dar. Ein modernes elektrisch unterstütztes Fahrrad wiegt gewöhnlich nicht mehr als 25 Kilogramm. Das ist ein Drittel dessen, was eine normalgewichtige erwachsene Person auf die Waage bringt. Ein Mittelklasseauto hingegen schlägt bei zeitgemäßer Ausstattung nicht selten mit 1,5 Tonnen Leergewicht zu Buche, mithin das 20-fache der gängigen Fahrer Masse.

Es ist wirtschaftlicher, Personen auf dem Fahrrad zu befördern, denn 75 % der investierten Energie kommen dabei dem Fahrer selbst zugute. Beim Auto mit nur einem Fahrer sind es nicht einmal 5 %. Selbst wenn mit fünf erwachsenen Personen voll besetzt, fällt die Beförderungsbilanz eines Pkw mit 20 % vergleichsweise mager aus.

E-Fahrräder haben binnen weniger Jahre einen hohen technischen Stand und ein großes Maß an Ausreife erreicht. Doch wie bei jeder jungen Technik fehlt es an allgemeinem und speziellem Fachwissen. Zu sehr sind unsere Vorstellungen über die Antriebstechnik noch vom Verbrennungsmotor geprägt. Steigerungsfähig ist auch unser Bewusstsein für Energieeffizienz, denn die bisher üblichen hochenergetischen fossilen Energieträger wie Benzin und Diesel forderten diesbezügliche Tugenden nicht wirklich heraus.

Im Vergleich zu Autos und Motorrädern bedient sich das Fahrrad einer überschaubaren Technik. Das Elektrofahrrad verändert die Situation grundlegend. Mit ihm halten komplizierte Steuerungselektroniken, neuzeitliche Energiespeicher und modernste Antriebstechniken Einzug.

Eine große Herausforderung für **Fahrradhändler, Zweiradmechaniker und Auszubildende**, ein Faszinosum aber auch für Bastler und solche, die ihr Fahrrad mit einem elektrischen Hilfsantrieb versehen wollen. Die Autoren des Buches, ein Maschinenbau- und ein Elektroingenieur, haben sich bemüht, die Materie leicht und verständlich darzustellen. Der Schwerpunkt des Buches behandelt die elektrischen und mechanischen Komponenten des Zusatz-Antriebes und ihr Zusammenwirken. Nebenmotoren, Mittel- und Tretlagerantriebe, Controller, Bedien- und Steuerelemente und natürlich auch die Akkus, die einen wesentlichen Teil eines Elektrorades ausmachen, werden ausgiebig beschrieben. Für jene, die ein Fahrrad selbst zum E-Bike umrüsten wollen, gibt es Hilfestellung.

Im Buch werden aber auch Themen wie „verwendungsgerechtes“ Elektrofahrrad, optimale Fahrweise, gesetzliche Vorschriften, Produktsicherheit und Einheitsstandards nicht vernachlässigt.

Mit der vorliegenden **3. Auflage** wurde die vorausgegangene Ausgabe komplett überarbeitet und erweitert sowie dem aktuell technischen und gesetzlichen Stand angepasst. Das Autorenteam und der Verlag wünschen viel Freude am Lernen und Arbeiten mit dem neuen „Fachwissen E-Bike“.

Die Erarbeitung von geeigneten Lehrmitteln für die junge E-Bike-Branche steht noch am Anfang. Änderungs- und Ergänzungswünsche sowie konstruktive Kritik nehmen wir per E-Mail gerne entgegen.

Sie erreichen uns unter [lektorat@europa-lehrmittel.de](mailto:lektorat@europa-lehrmittel.de).

<b>1</b>	<b>Geschichte der Elektrofahrräder</b>	<b>7</b>
<b>2</b>	<b>Rechtliche Bestimmungen und Sicherheit</b>	<b>13</b>
2.1	Definitionen	13
2.2	Unterteilung der E-Bikes	13
2.2.1	Pedelec 25	14
2.2.2	Pedelec 45 (S-Pedelec)	15
2.3	Lichtanlage, Beleuchtung	16
2.4	Gesetzliche Bestimmungen in Österreich	17
2.5	Gesetzliche Bestimmungen in der Schweiz	17
2.6	Maschinenrichtlinie	17
2.7	CE-Kennzeichnung und Konformitätserklärung	18
2.8	Bauteiletausch	19
2.9	Manipulationen	19
2.9.1	Technische Konsequenzen	19
2.9.2	Rechtliche Konsequenzen	19
2.10	Tuning	20
2.11	Selbststabilisierende Fahrzeuge	20
2.11.1	Segways	20
2.11.2	Elektroboards	21
2.11.3	Elektrisches Einrad, Tretroller	22
<b>3</b>	<b>Systemvergleich unterschiedlicher Motoren</b>	<b>23</b>
3.1	Verbrennungsmotor	23
3.2	Wirkungsgrad einer Wärmekraftmaschine	24
3.3	Muskelmotor	24
3.4	Elektromotor	27
3.5	Vergleich E-Motor und Verbrennungsmotor	27
3.6	Hybridantrieb	28
<b>4</b>	<b>Die Mechanik des Fahrrades</b>	<b>30</b>
4.1	Übersetzungen und geometrische Verhältnisse	30
4.2	Fahrwiderstände	32
4.3	Leistungsbedarf	36
4.4	Wirkungsgrade	39
<b>5</b>	<b>Antriebskonzepte</b>	<b>46</b>
5.1	Nabenantrieb	47
5.1.1	Vorderrad-Nabenantrieb	47
5.1.2	Hinterrad-Nabenantrieb	48
5.2	Tretlagerantrieb	49
5.3	Sitzrohrantrieb	51
5.4	Nachrüstmöglichkeiten	52
5.4.1	Reibrad-/Reibrollenantrieb	53
5.4.2	Bausatz-Radnabenantrieb	54
5.4.3	Bausatz-Tretlagerantrieb	55
5.4.4	Individuelle Antriebslösungen	56
5.5	Rekuperation und Freilaufsysteme	57
5.6	Antriebstuning	59
5.6.1	Physikalische Zusammenhänge	59
5.6.2	Gängige Tuning-Hilfsmittel	60
<b>6</b>	<b>Grundlagen der Elektrotechnik und Elektronik</b>	<b>61</b>
6.1	Elektrischer Strom	61
6.1.1	Spannung	61
6.1.2	Strom	61
6.1.3	Stromarten	62
6.1.4	Elektrischer Widerstand	62
6.1.5	Elektrische Arbeit	63
6.1.6	Elektrische Leistung	63
6.1.7	Wirkungsgrad	63
6.1.8	Kondensator	64

<b>6.2</b>	Magnetische Grundlagen	65
6.2.1	Dauermagnetismus	65
6.2.2	Elektromagnetismus	66
6.2.3	Elektromotorisches Prinzip	67
6.2.4	Generatorprinzip: Induktion	68
6.2.5	Lenz'sche Regel	68
6.2.6	Transformator	69
6.2.7	Selbstinduktion	69
6.2.8	Induktivität	70
<b>6.3</b>	Elektronische Bauelemente	70
6.3.1	Diode	70
6.3.2	Transistor	72
6.3.3	Hallsensor, GMR-Sensor	75
<b>7</b>	<b>Elektromotor und Antriebssteuerung</b>	<b>76</b>
7.1	Wirkungsgrad	76
7.2	Physikalische Grundlagen	76
7.3	Funktionsweise von Elektromotoren	78
7.4	Motoroptimierung	79
7.4.1	Bürstenlose Motoren	80
7.4.2	3-Phasen-Steuerung	84
7.5	Kommutierung	86
7.5.1	Sensorkommutierung	86
7.5.2	Sensorlose Kommutierung	86
7.6	Drehzahlsteuerung	87
7.6.1	Rekuperationssteuerung	88
7.7	Motor-Betriebsbereiche	88
7.8	Antriebssteuerung	91
7.8.1	Drehgriffsensor	91
7.8.2	Pedalsensor	91
7.8.3	Drehmomentsensor	92
7.9	Zusammenwirken von Mensch und Motor	94
7.10	Steuerelektronik (Controller)	94
<b>8</b>	<b>Akkumulatoren (Akkus)</b>	<b>99</b>
8.1	Grundlagen	100
8.1.1	Der Ionenstrom	100
8.1.2	Der Lösungsdruck – die treibende Kraft	103
8.2	Bauarten elektrochemischer Zellen	105
8.3	Elektrische Grundbegriffe in der Batterietechnik	108
8.3.1	Zellenspannung und Innenwiderstand	108
8.3.2	Kapazität und Stromrate	110
8.3.3	Energie, Leistung und Wirkungsgrad	110
8.3.4	Temperaturverhalten und Selbstentladung	112
8.3.5	Zyklenzahl, Alterung und Lagerung	113
8.3.6	Ladeverfahren	114
8.3.7	Verbinden von Zellen zu Batterien	115
8.4	Bleiakkus	116
8.5	Alkalische Akkus	119
8.6	Lithium-Ionen-Akkus	122
8.7	Akkupraxis	130
8.7.1	Akku-„Fitness“	130
8.7.2	Akkupflege	133
8.8	Akkusicherheit	134
8.8.1	Typische Gefahrenquellen	135
8.8.2	Brandschutzvorkehrungen	137
8.8.3	Entsorgung	138
8.9	Ladegerätetechnik	138
8.9.1	Ladeüberwachung	139
8.10	Ausblicke	140

Das Kathodenmaterial verfügt über ein Höchstmaß an Langzeitstabilität. So ist es bei  $\text{LiFePO}_4$ -Zellen vergleichsweise unkritisch, wenn die Ladeschlussspannung von 3,6 V pro Zelle kurzzeitig bis ca. 4 V überschritten wird. Die Zellen stellen geringere Anforderungen an die Lade-technik und können bei Rekuperation schnell Ladung aufnehmen. Laut einem amerikanischen Hersteller<sup>1</sup> liegt die Lebenserwartung bei mehreren tausend Zyklen. Aufgrund des günstigen Preises für das Rohmaterial und dessen weltweit hoher Verfügbarkeit erscheint die Hoffnung auf künftig fallende Preise nicht ganz unberechtigt.

der Phosphatverbindung dar. Hier sucht man mit Dotierungs- und Leitzusätzen, aber auch durch Strukturverbesserung, mit den wachsenden Möglichkeiten der Nanotechnik nach Auswegen.

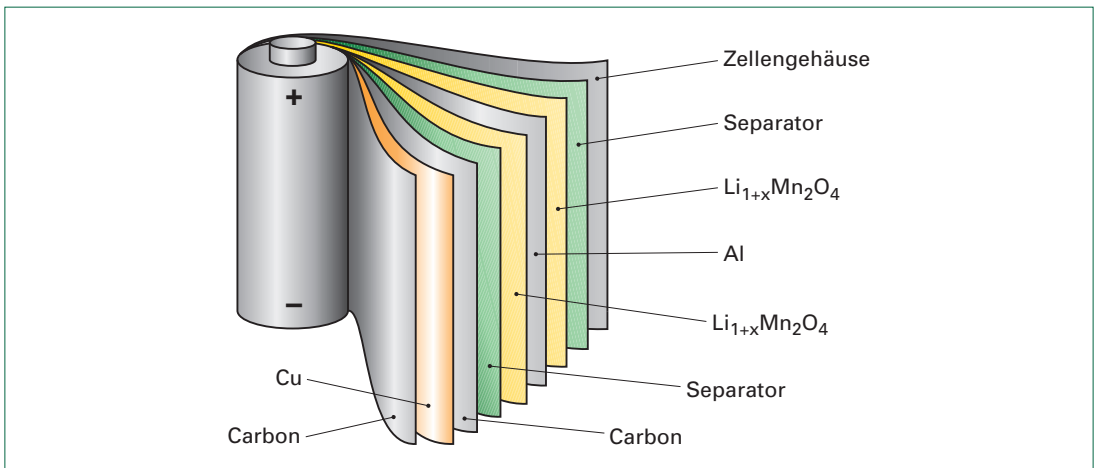
Bei der Herstellung werden die Aktivmaterialien mit speziellen Verfahren auf die Ableiterfolien aufgebracht und ausgewalzt. Eine funktionsfähige Batterie entsteht durch das enge Zusammenfügen von Anoden- und Kathodenfolie – unter Zwischenlage einer Separatorfolie, die auch den Elektrolyten aufnimmt (**Bilder 1 und 2**).

Ein noch nicht vollständig gelöstes Problem stellt die relativ geringe Elektronenleitfähigkeit

<sup>1</sup> A123 Systems



**Bild 1: Abgewickelte Folie einer Li-Ionen-Zelle**



**Bild 2: Zylindrische Li-Ion-Zelle mit Manganspinell-Kathode**

### Li-Ion Zellenvarianten

Nach der Gehäuseform unterscheidet man Becherzellen und Pouchzellen. Bei den **Becherzellen (Bild 1)** sind die straff aufgewickelten Folienelektroden in einem zylindrischen Alubecher untergebracht. Am gängigsten ist die Bechergröße 18650 mit 18 mm Außendurchmesser und 65,0 mm Höhe. Sie weisen Kapazitäten von etwa 2000 bis 3500 mAh auf, wobei erhöhte Kapazitätswerte typischerweise höhere Innenwiderstandswerte und damit kleinere C-Raten nach sich ziehen.

Der Becher fungiert gleichzeitig als Minuspol der Zelle. Davon isoliert ist der Zellendeckel mit dem Pluspol verbunden. Die Zelle wird gasdicht verschlossen. Ein durch Temperatur und/oder Überdruck gesteuertes Ventil sorgt dafür, dass die Stromzufuhr zum Pluspol irreversibel unterbrochen wird und der entstandene Überdruck im Extremfall entweichen kann.

Mit Becherzellen werden derzeit die höchsten Energiedichtewerte erreicht. Im Übrigen garantieren hohe Produktionszahlen eine geringe Streuung von Kapazität und Innenwiderstand, was beim Zusammenstellen großer Batterien nicht unwichtig ist.

Die wachsende Nachfrage nach Energiespeichern mit hoher Kapazität bringt es mit sich, dass in jüngerer Zeit zunehmend auch größere Zellen mit der Bechergröße 26650 (26 mm Durchmesser und 65,0 mm Höhe) produziert werden<sup>1</sup>. Als Nachteil großer Becherzellen gelten die schlechtere Wärmeableitung aus dem inneren Bereich sowie die wenig flexible Gestaltungsmöglichkeit der Batteriepacks durch die genormte Bechergröße.

<sup>1</sup> Neu: 21700 „3Tron“ vom BMZ mit 60 % größerer Kapazität



Bild 1: Becherzellen der Größen 18650 und 26650

Im Gegensatz dazu haben die Batteriedesigner bei Batterien aus **Pouchzellen** mehr Spielraum. Diese flexiblen Zellen, oftmals auch als Folien- oder Coffee-Bag-Zellen bezeichnet, haben kein festes Gehäuse (**Bild 1**).

Die Umhüllung ist eine tiefgezogene, mit Aluminium beschichtete, an den Rändern dicht verschweißte Kunststofffolie, bei der die Ableiter als dünne Metallstreifen einseitig (seltener beidseitig) herausgeführt werden. Elektrodenmaterialien und Zellchemie sind mit den Becherzellen vergleichbar. Eine Polymermatrix hält hier die verschiedenen Folien zusammen. Diese sorgt auch dafür, dass der Elektrolyt, der zusätzlich durch ein Gel eingedickt sein kann, im Fall einer Zellwandbeschädigung nicht ausläuft.

Das leichte Gehäuse ermöglicht es, mehr Energie bei gleichem Gewicht zu speichern. Meistens sind Pouchzellen auf hohe Lade- und Entladeströme optimiert.

Dies ist besonders in der Modellbauszene zu beobachten, wo sie als LiPos bezeichnet werden und Entladeströme bis zu 60 C ermöglichen. Empfindlich sind Coffee-Bag-Zellen gegen äußere Gewalteinwirkung. Gelegentlich ist zu beobachten, dass sich Folienzellen bei Überlastung oder als Folge von Fehlbehandlung aufblähen und im Extremfall platzen können. Als besonders empfindlich gilt der Bereich der Foliennaht, an dem die Stromableiter herausgeführt sind.



**Bild 1: Pouchzellen**



Lithium-Ionen-Ladetechnik

Voraussetzung für ein sicheres Arbeiten mit Li-Akkus ist die Anwendung der richtigen Ladetechnik wie auch die Verwendung geeigneter Ladegeräte. Li-Akkus zeigen wenig Toleranz gegen Fehlbehandlung.

info

Lithium-Akkus dürfen ausnahmslos nur mit dafür geeigneten Ladegeräten aufgeladen werden.

So erlauben Li-Akkus keine Überladung. Bis heute verfügen sie über keinerlei „innere Mechanismen“, die eine Überladung unschädlich abbauen. Es kommt hinzu, dass der Übergang in die Überladephase anfangs nicht, wie bei dem sich heftig erwärmenden NiCd-Akku, an außen fühlbaren Reaktionen kenntlich wird. Ein Lithium-Akku nimmt jenseits des Limits weiter Energie auf und speichert sie ab. Die Zellenspannung steigt über den erlaubten Grenzwert. Zudem setzen beim Überschreiten des Grenz-

wertes sofort chemische Reaktionen mit irreversiblen Folgen ein, die anfangs weitgehend unerkannt bleiben.

Diese sind u. a. dadurch verursacht, dass der positiven Elektrode zu viel Lithium entzogen wird, wodurch sie chemisch instabil wird und im Extremfall Sauerstoff abgeben kann. Dies gilt vor allem bei Kathoden auf Cobalt- und Nickelbasis. Zudem können sich auch an der bereits vollgeladenen negativen Elektrode Lithiumatome außen ablagern und dort unerwünschte Beläge und Grenzschichten ausbilden (sog. *Plating*).

Sobald Indizien wie Erwärmung, Aufblähung oder ventilgesteuerter Druckabbau erkennbar werden, ist der Akku bereits geschädigt. Eine mögliche Überladung muss deshalb durch eine geeignete Ladeelektronik ausgeschlossen werden.

Li-Akkus werden nach der *IU*-Kennlinie geladen (Bild 1).

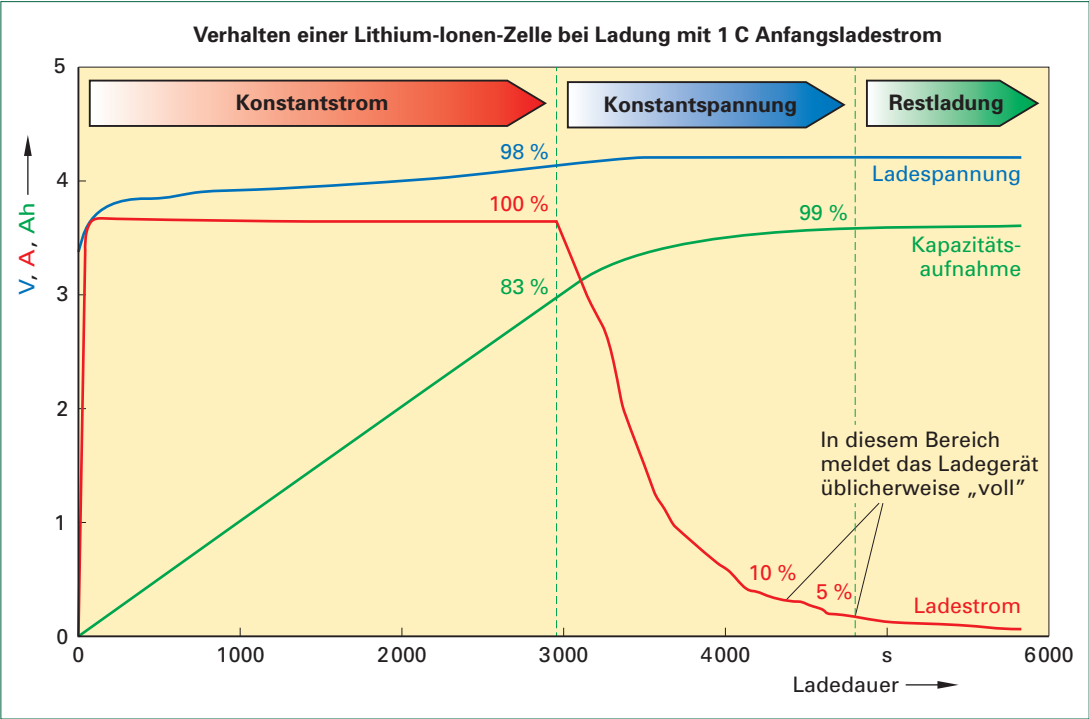


Bild 1: Ladekennlinie eines Lilon-Akkus

Anfangs begrenzt das Ladegerät den Strom. Gleichzeitig sorgt es dafür, dass die in diesem Bereich ansteigende Ladespannung das vorgegebene Limit nicht überschreitet. So kommt es zu einem fließenden Übergang von Konstantstromladung mit steigender Spannung zur Konstantspannungsladung mit fallendem Strom.

Die Ladezeit hängt nicht allein vom eingestellten Ladestrom ab (den man deshalb zutreffender als „**Anfangsladestrom**“ bezeichnen sollte), sondern auch vom Gesamtwiderstand. Zum Gesamtwiderstand tragen alle Leitungs- und Übergangswiderstände des Ladekabels und der eventuell vorhandenen Steckverbindungen bei. Sein Gesamtwert wird jedoch in entscheidendem Maße vom Innenwiderstand des Akkus bestimmt. Die Gesamtladezeit nimmt mit wachsendem Akkualter immer mehr zu und ist als Gradmesser zu betrachten.

Die Hersteller empfehlen üblicherweise, einen Anfangsladestrom der Größenordnung 0,5 C einzustellen, tolerieren meist aber Laderaten bis 1 C. Darüber hinaus steigt die Gefahr der Ausbildung von Anodenablagerungen. Eine Ausnahme bilden Zellen mit einer  $\text{LiFePO}_4$ -Kathode, bei denen laut Datenblatt bis zu 4 C statthaft sind.

Die Ladezeit wird nicht halbiert, wenn der Ladestrom verdoppelt wird, weil der Zeitpunkt des Übergangs auf die  $U$ -Ladung bei niedrigerem Ladegrad erfolgt. Der von hier an absinkende Ladestrom folgt dem ohmschen Gesetz, bevor das Ladegerät endgültig abschaltet, wenn der Restladestrom auf 10 bis 5 % des Anfangswertes abgesunken ist. Dies ist aus Gründen der Ladesicherheit nicht zwingend nötig, weil der Ladestrom langfristig gegen Null tendiert, erspart dem Akku aber den „Langzeitaufenthalt“ in der Nähe des Spannungslimits, wo bereits Nebenreaktionen einsetzen.

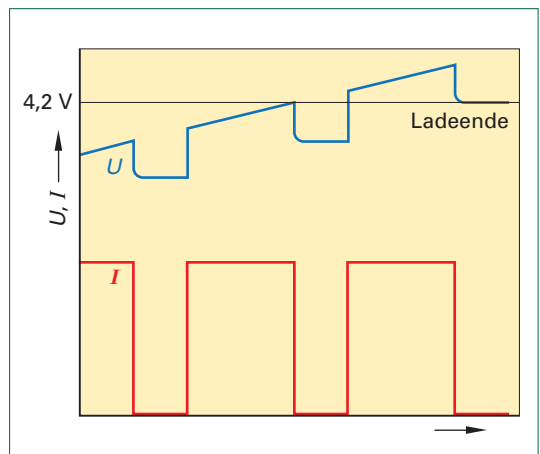
Lithium-Ladegeräte enthalten noch weitere Sicherheitsfunktionen, so den Vorladetest (Pre Charge Test). Hierbei wird geprüft, ob der Akku im Falle einer niedrigen Zellenspannung in einem ladefähigen Zustand ist, weil dies auch vom Kurzschluss einzelner Zellen herrühren könnte. Daher wird mit geringem Strom vorge-  
laden. Nur wenn die Akkuspannung innerhalb

eines definierten Zeitraums einen Schwellwert überschreitet, kann mit normalem Strom geladen werden.

### Ladezeitverkürzung

Mit denen bei Elektrofahrrädern heute gängigen Lademethoden dauert die Aufladung eines zuvor vollständig entladenen Akkus 2 – 4 Stunden. Der Möglichkeit, den Akku schneller laden zu können, sind Grenzen gesetzt, da bei erhöhtem Anfangsladestrom der Akku die Konstantspannungsphase früher erreicht (siehe Bild 1, S. 128). Eine Verdoppelung des Anfangsladestromwerts führt somit keineswegs zu einer Halbierung der Ladezeit, weil der Akku den Ladestrom in der Endphase der Ladung von sich aus begrenzt. Ursache hierfür ist der Widerstand im Ladekreis, der, wenn die Zellenspannung sich der Ladeschlussspannung von z. B. 4,2 V stark annähert hat, wegen der nunmehr zu kleinen Spannungsdifferenz nicht mehr den vollen Strom zulässt.

Gleichwohl nutzen einige Ladegeräte den Umstand, dass der dynamische Innenwiderstand (Wechselstromwiderstand  $R_{iAC}$ ) der Akkuzellen kleiner ist als der statische Innenwiderstand (Gleichstromwiderstand  $R_{iDC}$ ). Somit wird in der Endphase mit Impulsströmen geladen, wodurch sich die Ladezeit reduziert (**Bild 1**). Wegen der damit verbundenen messtechnischen Herausforderung, kommt das Verfahren jedoch nur im hochprofessionellen Bereich zum Einsatz.



**Bild 1: Spannungs- und Stromverlauf bei Impulsladung von Lilon-Akkus**

## 8.7 Akkupraxis

Akkus speichern die Energie für den motorischen Antrieb. Es ist daher naheliegend, sie als „Stromtanks“ zu begreifen. Dass dieser Vergleich nicht in jedem Fall zutrifft, wird nachfolgend deutlich: Ein Kraftstofftank fasst unabhängig von Alter und Nutzungsdauer immer die gleiche Stoffmenge. Es ist weitgehend egal, wie er befüllt und geleert wird. Die Art der Vorbehandlung bleibt ohne Bedeutung, es ist immer die gleiche Menge zu entnehmen. Allein schon das lässt sich auf den Stromspeicher nicht übertragen. Wie „gut“ ein Akku seine Aufgabe erfüllt, hängt daher nicht nur von seinen Kennwerten (z. B. Nennspannung, Kapazität, Energieinhalt), sondern auch von der vorausgegangen Pflege und den jeweiligen Einsatzbedingungen ab.

### 8.7.1 Akku-„Fitness“

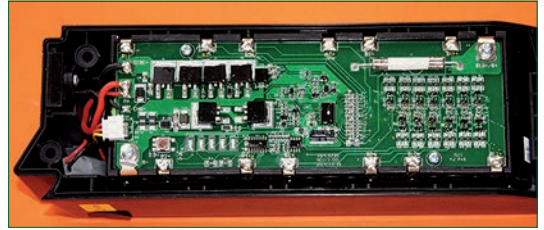
Energie, die in chemischer Form im Akku gespeichert ist, kann nicht verlustfrei in elektrische Energie umgeformt werden. Im Wesentlichen sind es zwei Verlustarten, die im Akkubetrieb auftreten:

- Selbstentladung
- Interne Spannungsverluste

Die Selbstentladung spielt beim Lilon-Akku nahezu keine Rolle mehr. Sie liegt im Normalfall unterhalb von 1 % je Monat. Chemische Nebenreaktionen können hierfür die Ursache sein (siehe Kapitel 8.7.2). Hohe Temperaturen wirken beschleunigend.

Nicht ganz zu vernachlässigen sind Ladungsverluste, verursacht durch die im Batteriegehäuse integrierte Elektronik. Ein modernes Batterie-Management-System (BMS, **Bild 1**) benötigt zwar nur wenig Energie, weil es sich bei längerem Nichtgebrauch selbsttätig in den Schlafmodus versetzt, es kann aber in einer mehrmonatigen Winterpause doch zu einem messbaren Ladungsverlust beitragen.

Hierdurch kam es in der Anfangszeit, als die Module noch nicht energieoptimiert waren, öfters zu schädigenden Tiefentladungen. Der Grund: Nahezu „leergefahrene“ Akkus wurden in der darauf folgenden Lagerzeit vom Ruhestrom des BMS vollends tiefentladen.



**Bild 1:** Die BMS-Elektronik ist integraler Bestandteil des Batteriepacks und wird von der Batterie mit Strom versorgt. Bei modernen Systemen ist der Ruhestrom gering.

Auch aktuell empfiehlt es sich *nicht*, vollständig entladene E-Bike-Akkus länger, wie beispielsweise über die Winterpause, zu lagern. Man sollte sie ca. halbvoll geladen (alles zwischen 30 % und 70 % SOC ist in Ordnung) aufbewahren und den Ladezustand alle 4 bis 6 Wochen überprüfen (**Bild 2**). Dieser lässt sich bei modernen E-Bike-Akkupacks leicht mit der eingebauten LED-Anzeige kontrollieren.



**Bild 2:** LED-Spannungsmonitor am Batteriepack. Richtiger Einlagerungszustand, wenn 2 oder 3 (von 4) grünen LEDs leuchten.

Schwerer wiegen in der Verlustenergiebilanz die durch den Innenwiderstand des Akkus verursachten Spannungsverluste. Sie steigen proportional mit dem Entladestrom und dem Zellenwiderstand.

Der Zellenwiderstand ist bei Akkus bauart- bzw. typbedingt und steigt mit der Alterung. Bei den überwiegend zum Einsatz kommenden 18650er Lilon-Zellen liegt er bei intakten Zellen im Bereich von 20 bis 100 mΩ (bei 20 °C) je nach Bauart der Zelle.

Sind die Zellen parallel geschaltet, vermindert sich dieser Wert um den Faktor der Parallelzellenzahl. Bei Reihenschaltung multipliziert sich der Widerstandswert mit der Zahl der Reihenzellen.

Beispiel:

Die Einzelzelle eines neuen 10s5p-Akkupacks weist (bei 20 °C) einen Gleichstrominnenwiderstand  $R_i$  von 20 mΩ auf. Dann kommt man bei einer Parallelschaltung von 5 Zellen nur noch auf einen Innenwiderstand von

$$R_{i(5p)} = \frac{20 \text{ m}\Omega}{5} = 4 \text{ m}\Omega$$

Schaltet man 10 dieser 5p-Packs in Serie, ergibt sich ein Gesamtbatterie-Innenwiderstand  $R_{i(10s5p)}$  von

$$R_{i(10s5p)} = 4 \text{ m}\Omega \cdot 10 = 40 \text{ m}\Omega = 0,04 \Omega$$

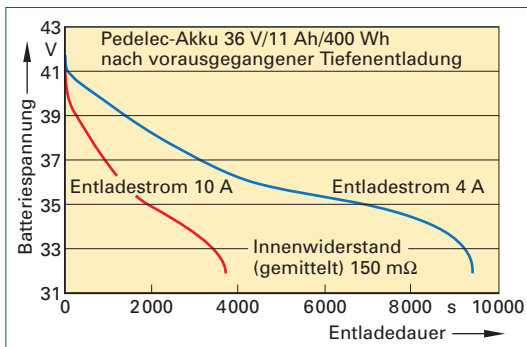
Wird dieser Akku mit 10 A belastet, so errechnet sich ein Spannungsverlust von

$$U_{Ri} = I \cdot R_{i(10s5p)} = 10 \text{ A} \cdot 0,04 \Omega = 0,4 \text{ V}$$

Das entspricht bei einer Ladespannung von 42 V ein Verlust von ca. 1 %.

Die anfallende Verlustleistung ( $P_v$ ) fällt mit  $P_v = I^2 \cdot R_{i(10s5p)} = (10 \text{ A})^2 \cdot 0,04 \Omega = 4 \text{ W}$  moderat aus.

Sind die Zellen jedoch stark gealtert und/oder aus Gründen früherer Fehlbehandlung degeneriert, kann sich der Wert des Innenwiderstandes vervielfachen (**Bild 1**). So wurde bei einem Akku nach einmaliger Tiefentladung (bis auf 1 V/Zelle) ein Innenwiderstand von 200 mΩ gemessen. Nun ergibt dieselbe Berechnung einen Gesamtwiderstand von 0,4 Ω.



**Bild 1: Spannungsverlauf eines vorgeschädigten Akkus bei unterschiedlichen Belastungsströmen.**

Wird dieser Akku mit 10 A belastet, so wird sich auch der Spannungsverlust auf 4 V verzehnfachen.

Das Beispiel geht weiter:

Der Akku, der auf 42 V geladen wurde, gibt an seinen Klemmen dann nur noch 38 V ab. Nahezu 10 % der Spannung „verbleiben“ somit als Verluste im Akku.

Die anfallende Verlustleistung ist nun nicht mehr vernachlässigbar, entspricht sie doch der Heizleistung eines mittelgroßen Lötkolbens.

$$P_v = I^2 \cdot R_{i(10s5p)} = (10 \text{ A})^2 \cdot 0,4 \Omega = 40 \text{ W}$$

Das einzig Positive an der Veränderung: Die Akkutemperatur steigt damit an, wodurch der Innenwiderstand wieder etwas sinkt. Bei eher kühlen Außentemperaturen kann dieser Effekt willkommen sein, da sich der Akku nun selbst „warmarbeitet“.

Unmittelbar bemerkt der Fahrer den Spannungsverlust bei normaler Belastung nicht, da der Motor dann nur mit einem Teil der Akkuspannung (Kapitel 7.6) betrieben wird.

Doch es verändert sich infolge der gesunkenen Spannung an den Akkuklemmen das Puls-Pausenverhältnis der PWM, was im Ergebnis einer höheren Stromaufnahme gleichkommt. Für den E-Bike-Fahrer läuft dies auf eine Reduzierung der Reichweite hinaus, denn es fließt nicht nur mehr Strom aus dem Akku, sondern das BMS meldet aufgrund des inneren Spannungsabfalls auch früher „Batterie leer“.

Der Einfluss des Innenwiderstands lässt sich auch verdeutlichen, wenn man die Entladekurven eines Akkus bei verschiedener Belastung darstellt (Bild 1). Hier wurde der Akku aus dem letzten Beispiel (36 V, 11 Ah ≈ 400 Wh) mit Dauerstrom unterschiedlicher Höhe entladen. 4 A entspricht im Mittel einer leichten Unterstützungsstufe (z. B. Stufe eco), während ein gemittelter Strom von 10 A den Fahrer schon sehr forciert unterstützt.

Wie aus den Kurven hervorgeht, hängt die Spannung, die ein Akku abgibt, sowohl vom jeweiligen Entladezustand als auch von der anliegenden Belastung ab.

Daher sind Rückschlüsse von der Akkuspannung auf die Restkapazität nur im unbelasteten Zustand der Batterie einigermaßen sinnvoll.

Doch auch hier ist die Relation zwischen Restkapazität und Spannung nicht linear. Entlädt man den Akku, wie im Diagramm gezeigt, mit konstantem Strom, so fällt die Spannungs-kurve anfangs moderat ab, um dann in einen flacheren Verlauf überzugehen. Ganz am Ende stürzt dann die Kennlinie förmlich ab. Diesen Bereich gilt es möglichst zu vermeiden. Um eine grobe Vorstellung vom Zusammenhang zwischen Spannung und Restkapazität zu vermitteln, mag folgendes Zahlenbeispiel helfen:

Ein Spannungsmonitor für eine 10s Lilon-Batterie (Nennspannung 37 V) mit 4 grünen LEDs lässt folgende Rückschlüsse auf die Leerlaufspannung zu.

4 LEDs hell	$U_0 = 42,0 \dots 39,0 \text{ V}$
3 LEDs hell	$U_0 = 39,0 \dots 37,0 \text{ V}$
2 LEDs hell	$U_0 = 37,0 \dots 36,3 \text{ V}$
1 LED hell	$U_0 = 36,3 \dots 35,3 \text{ V}$
Rote LED hell	$U_0 < 35,3 \text{ V}$

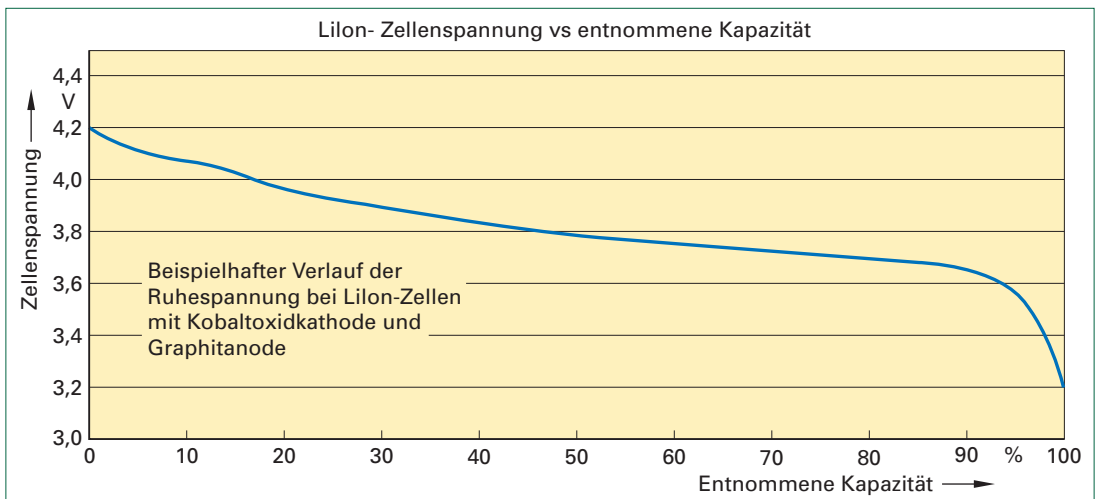
Die Werte können je nach Fabrikat abweichen. Der Spannungsverlauf hängt unter anderem von der Akkuchemie ab. Hierbei spielt die Zusammensetzung der Kathode (Kapitel 8.6) eine ausschlaggebende Rolle.

**Info**

Der LED-Spannungsmonitor misst lediglich die Akkuspannung und liefert daher nur einen groben Anhaltspunkt für die im Akku verbliebene Ladungsmenge. Auswertbare Rückschlüsse auf die Restkapazität erlaubt aber nur die Leerlaufspannung. Um eine brauchbare Einschätzung zu gewinnen, sollte man den Kontrollknopf der LED-Anzeige daher nur drücken, wenn der Akku zu diesem Zeitpunkt weder geladen noch entladen wird.

Leistungsentscheidend ist auch die Wahl des richtigen Akkutyps. Nicht immer ist der Akku mit der höheren Wattstundenangabe für alle Einsatzfälle besser geeignet. Denn obgleich die Weiterentwicklung der Lilon-Akkutechnik von den Herstellern tatkräftig vorangetrieben wird, so ist es immer noch nicht möglich, eine Zelle nach allen Zielrichtungen zu optimieren.

Wird mehr Kapazität gewünscht, so geht das nur um den Preis eines höheren Innenwiderstandes. Der Akku kann dann zwar mehr Kapazität speichern, gibt aber bei gleichem Entladestrom weniger Spannung ab, da ein größerer Teil davon am höheren Innenwiderstand  $R_i$  verloren geht. Relevant wird dies beim Einsatz in vorwiegend steilem Gelände. Nochmals hingewiesen werden soll hier auf den allgegenwärtigen Einfluss der Temperatur. Grundsätzlich steigt bei allen elektrochemischen Stromquellen der Innenwiderstand bei Kälte an.



**Bild 1: Der Zusammenhang von Zellenspannung und entnommener Kapazität ist zellentypabhängig und nicht linear.**

Andererseits begünstigen hohe Temperaturen die schädlichen Nebenreaktionen in den Zellen. Die ideale Arbeitstemperatur liegt bei Lithium-Ionen-Akkus im Bereich zwischen 15 und 40 °C (sie deckt sich somit wenigstens teilweise mit dem „Wohlfühlbereich“ der meisten der E-Bike-Fahrer).

### 8.7.2 Akkupflege

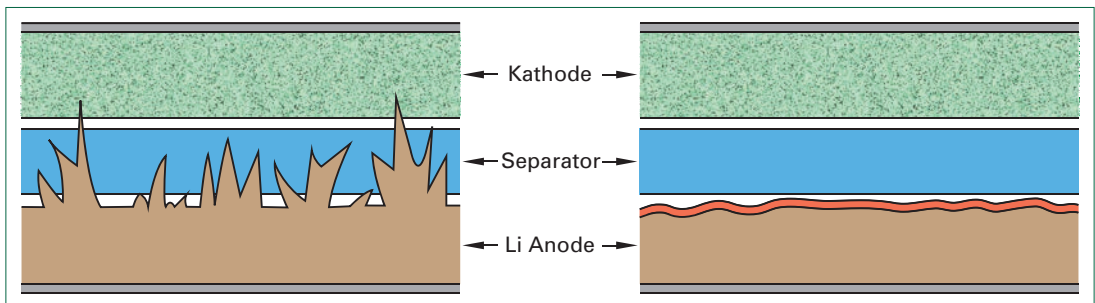
Die Energieerzeugung bei Akkus beruht auf elektrochemischen Reaktionen. Dabei unterscheidet man zwischen den gewollten Hauptreaktionen und ungewollten Nebenreaktionen. Letztere finden ihre Ursache zumeist in kleinen Verunreinigungen, wie sie bei industriellen Fertigungsprozessen nie vollständig auszuschließen sind.

Es zählt daher zu den großen Herausforderungen der Zellenherstellung, während des gesamten Produktionsprozesses ein Höchstmaß an Reinheit zu garantieren. Bei den etablierten, derzeit ausschließlich in Fernost beheimateten Marken wie LG, Panasonic, Samsung, Sanyo und Sony ist dies weitgehend garantiert. Bei den No-Name-Produkten kann es anders aussehen. Bei einer eventuellen Ersatzbeschaffung von Akkuzellen ist dies zu beachten. Ein weiterer Grund für degenerative Veränderungen innerhalb einer Batteriezelle liegt in der Eigenart des Ionenstroms. Lade- und Entladevorgänge basieren auf einem Ionenfluss zwischen den Polelektroden und dem Anlagern von Ionen an der aktiven Elektrodensubstanz. Dabei verteilen sich die Anlagerungen nicht immer in der gewünscht homogenen Weise über den Elektroden. Es kommt zu einer Art „Geländebildung“, erhabener Stellen bis hin zu sog. Dendriten, die in Form von Spitzen durch den Separator hindurch wachsen und auf der anderen Seite

zu Kurzschlüssen führen können (**Bild 1**). Bei Lithium-Ionen-Zellen wird dieses Dendritenwachstum prinzipiell verhindert, allerdings nur, wenn die Zelle keine Behandlungsfehler wie etwa Überladung oder Tiefentladung erfahren hat. Grundsätzlich unterliegen alle elektrochemischen Stromquellen einem Alterungsprozess. Vom Erreichen der Altersgrenze spricht man bei Akkus, wenn sie nur noch über 80 % ihrer ursprünglichen Kapazität verfügen. Dies ist besonders erwähnenswert, weil viele Elektrofahrradhersteller diese Grenze bei 70 % angeben, was natürlich zu einer höheren Zahl von Zyklen führt. Einer weiteren Nutzung mit reduzierter Reichweite steht in beiden Fällen bei E-Bikes natürlich nichts entgegen. Problematisch wird es erst, wenn der Innenwiderstand soweit angestiegen ist, dass der Antrieb keine angemessene Leistung mehr erbringt.

Beschleunigt wird die Zellenalterung bei Lithium-Ionen-Akkus durch:

- Zu schnelles Laden, insbesondere bei tiefen Temperaturen ( $< 10\text{ °C}$ ). Sollte das Ladegerät dem Nutzer die Wahl zwischen schneller (1 h bis 2 h) und langsamer (2 h bis 4 h) Ladung ermöglichen, fördert die Langzeitladung grundsätzlich die Lebensdauer, namentlich bei Niedrigtemperaturen. Im Normalfall reduziert das BMS den Ladestrom bei ungünstigen Temperaturverhältnissen selbsttätig. Bei Minusgraden lohnt es sich, den Akku auf Zimmertemperatur vorzutemperieren.
- Lagern und Betreiben bei hohen Temperaturen ( $> 50\text{ °C}$ ). Diese können durch zu hohe Entladeströme entstehen, was beim Einsatz in E-Bikes eher unwahrscheinlich ist und durch das BMS wirksam verhindert wird, denn es überwacht sowohl die Temperatur des Akkupacks wie auch den Entladestrom.



**Bild 1: Dendriten zwischen Anode und Kathode**



- Daher sollte das Augenmerk ebenso den äußeren Temperatureinflüssen gelten. Es ist dringend abzuraten, den Akku längere Zeit auf der Heizung zu lagern oder ihn den Temperaturen in einem geschlossenen Pkw auszusetzen, wo bei starker Sonneneinstrahlung Temperaturen von deutlich mehr als 60 °C auftreten können. Selbst unter Fahrrad-Transportschutzhüllen können durch den Treibhauseffekt extreme Temperaturen entstehen.
- Längeres oder häufiges Lagern im vollgeladenen Zustand (**Bild 1**)
- Ständiges oder häufiges vollständiges Entladen

Die letzten beiden Punkte bedürfen einer vertieften Betrachtung: Mit jedem Lade-/Entladezyklus verliert der Akku einen (geringen) Teil seiner Kapazität. Einflussgebend ist der Energiedurchsatz:

Dabei erscheint es zuerst egal, ob der Energiedurchsatz mit wenigen Vollzyklen (SOC  $\approx$  0 bis 100 %) oder einer entsprechend vermehrten Zahl von Teilzyklen (z. B. SOC  $\approx$  50 bis 100 %) erfolgt.

Allerdings haben bei Lithium-Ionen-Akkus (wie auch bei den meisten anderen Akkutypen) extreme Ladezustände einen alterungsbeschleunigenden Einfluss. So ist es beispielsweise besser, einen Akku nie ganz „leer“ zu fahren, sondern die Entladung, wenn möglich, bei SOC 20 ... 15 % (auf dem Akku-Ladedisplay leuchtet noch eine LED) zu beenden. Wenn es dann doch zu einer tieferen Entladung kommt, empfiehlt sich ein zeitnahes Wiederaufladen auf SOC 30 ... 50 %.



**Bild 1: Zum Zwischenlagern geeignet: Mittlerer Ladezustand. Anzeige 2 ... 3 von 4 LEDs**

Ähnlich verhält es sich mit dem oberen Grenzwert. Wer den Akku immer nur zu 80 % ... 85 % voll lädt, erhöht dessen Lebenserwartung. Nun steht diese Empfehlung fraglos im Widerspruch zu dem Bestreben, möglichst viel Energie mit auf den Weg zu nehmen, und sei es nur, um den Akku, wie oben erwähnt, nicht vollständig „leer“ fahren zu müssen.

Trotzdem ist es klug, absehbar kurze Touren nicht mit vollem Akku anzutreten. Es empfiehlt sich gleichermaßen, die Dauer des vollgeladenen Akkuzustands anwendungsorientiert zu begrenzen, den Akku also erst kurz vor der geplanten Fahrt wirklich vollzuladen. Gegen ein die Restladezeit verkürzendes „Vorladen“ des Akkus auf SOC 70 % bis 80 % spricht hingegen nichts.

Neben den hier genannten weitgehend vom Nutzer steuerbaren Einflussgrößen spielt bei der Akkualterung die Zeit eine Rolle. Man geht davon aus, dass bei Lithium-Ionen-Akkus nach 6 ... 7 Jahren erkennbare Degenerationserscheinungen auftreten können. Man spricht dabei von „Kalendarischer Alterung“.

## 8.8 Akkusicherheit

Der Akkusicherheit wird herstellerseitig aufgrund einschlägiger Erfahrungen ein hoher Stellenwert eingeräumt, denn Lilon-Akkus sind wenig fehlertolerant. Daher muss eine periphere Elektronik (BMS) den Akku so weit wie möglich vor Fehlbehandlung schützen.

Aus diesem Grund sind bei Bosch-Akkus die Batteriepole nicht direkt mit der Steckerleiste verbunden. Man kann die aktuelle Batteriespannung nicht direkt messen. Der Akku muss über die dritte Anschlussklemme via CAN-Bus erst aktiviert werden. Somit ist es nicht möglich, den Akku ohne Fahrrad zu entladen.

Auch die Ladung funktioniert erst, wenn das richtige Ladegerät angeschlossen ist. Der Preis dafür: Batteriediagnosen sind daher auch für sachverständige Laien kaum durchführbar.

Andere Fabrikate lassen an den Batterieklemmen nur hochohmige Messungen zu. Sobald man die Buchsen nennenswert belastet, bricht die Spannung zusammen. Damit soll verhin-

dert werden, dass es über ungeeignete Prüfmethoden zu Tiefentladungen kommt. Ältere Akkupacks verfügen teilweise noch nicht über solche Schutzmechanismen (**Bild 1**).



**Bild 1:** Bei manchen Akkutypen (rechts) lässt sich an den mit + und – bezeichneten Buchsen die Spannung zwar (hochohmig) messen, die Stromquelle ist aber ohne Aktivierung durch die Fahrradelektronik nicht belastbar. Bei dem linken Akku sind solche Schutzvorrichtungen nicht eingebaut.

Immer wieder ist auch von brennenden Akkus die Rede, ein Thema, das die Sensationspresse gerne aufgreift (**Bild 2**). Fahrradbatterien sind davon nicht ausgenommen. Dabei handelt es sich fast ausschließlich um moderne Akkus auf Lithium-Ionen-Basis. Warum ist gerade diese Technologie dafür anfällig? Der Hauptgrund ist die hohe Energiedichte. Lilon-Zellen können mehr Energie speichern als zur Selbstentzündung nötig. Das war z. B. bei Pb- oder NiCd-Akkus noch nicht der Fall. Zudem verfügten beide Akkutypen über zumindest zeitweilig wirksame Überladeabwehr-Mechanismen.



**Bild 2:** Ein Akkubrand beginnt meist mit starker Rauchentwicklung. Atemschutz!

Beispiele:

- Beim Bleiakku wird im Überladefall der wässrige Anteil des Elektrolyts zersetzt (Gasung).
- Bei alkalischen Akkus verwandelt sich die nicht mehr speicherbare Überladeenergie in Wärme.
- Lithium-Ionen-Akkus hingegen verfügen bis heute über keine eingebaute Überlade-Abwehrstrategie. Dennoch zielt die Entwicklung auf das Erreichen immer höherer Energiedichten ab. Hinzu kommt, dass Akkus auf Lithiumbasis statt wässriger Elektrolyte organische Lösungsmittel enthalten, die allesamt als gut brennbar einzustufen sind.

Bei extrem hohen Zellentemperaturen ( $> 150\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) kann sich bei bestimmten Zellentypen das Kathodenmaterial unter Sauerstoffabgabe zersetzen. Das Brandrisiko ist also *systemimmanent* und kann nur durch äußere Vorkehrungen verhindert werden.

Hierzu dient die Anwendung einer speziellen Lithium-Ladetechnik sowie verschiedene elektronische Schutzschaltungen, bekannt unter dem Sammelbegriff Batteriemanagementsystem (BMS).

#### Info

Wird die elektronische Überwachung entfernt oder unwirksam gemacht, kann es zu einem Brand führen. Allerdings schwindet die Brandgefahr mit zunehmender Entladung der Zellen. Auch deshalb macht es Sinn, Akkus nicht in vollgeladenem Zustand aufzubewahren.

### 8.8.1 Typische Gefahrenquellen

#### Mechanische Beschädigung

Einschlägige Vorschriften besagen, dass Fahrradakkus vor der Zulassung verschiedene Testzyklen durchlaufen müssen. Hierzu zählen unter anderem die mechanische Beanspruchung bei simulierten Stürzen oder Unfällen. Gleichwohl ist nicht 100-prozentig auszuschließen, dass infolge mechanischer Gewalteinwirkung und daraus folgender Gehäusedeformierung sog. Hotspots im Zelleninneren entstehen können.



Das sind eine Art Mikrokurzschlüsse, die nicht sofort bemerkt werden. Es handelt sich dabei um sich allmählich erheizende Zonen, die zu einer fortschreitenden Zerstörung des Separators und nach einer gewissen Verzögerungszeit zu wirklichen Kurzschlüssen führen können. Wenn dann immer noch genügend Energie im Akku vorhanden ist, kann dieser sich entzünden.

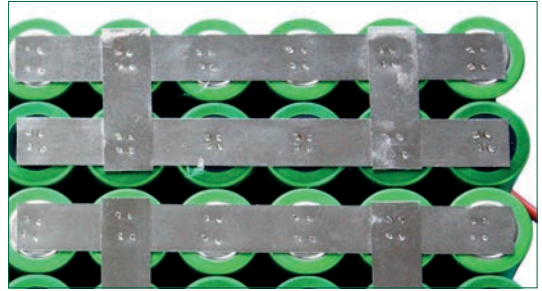
### Info

Es empfiehlt sich, Akkus nach einer sichtbaren Beschädigung der Gehäuse (beispielsweise auch infolge versehentlichen Herunterfallens) erst einmal für einige Stunden im Freien zu lagern und anschließend von einem Fachmann inspizieren zu lassen.

Vorsicht ist geboten, wenn im Inneren der Batterie einzelne Zellen schwere Dellen oder gar Löcher aufweisen. Wurde dabei die Separatorfolie, welche die beiden Elektroden auf Abstand hält, aufgescheuert oder durchlöchert, ist die Trennung der Elektroden nicht weiter gewährleistet. Es kann dann im Extremfall zu inneren Kurzschlüssen kommen. Im Allgemeinen sind E-Bike-Akkus durch die Batteriegehäuse sehr wirksam geschützt (Schock-Absorber). Kommt es dennoch zu erkennbaren Beschädigungen, sollte vor der nächsten Ladung unbedingt ein Fachmann zurate gezogen werden.

Ersatzakkus sind mitunter recht teuer. Damit erhebt sich die Frage der Reparierbarkeit beschädigter Batterien. Grundsätzlich spricht nichts gegen die Auswechslung einzelner defekter Zellen in einem Batteriepack, sofern diese Zellen durch Gleichartige ersetzt werden. In der Praxis dürfte es dem Amateur indes schwerfallen, hier „unfallfrei“ zu agieren. Denn zum einen ist es wichtig, dass die neu eingesetzten Zellen den gleichen Ladezustand wie die im Pack verbleibenden aufweisen. Ansonsten kann es während des Verbindungsvorgangs zu Ausgleichsströmen von unkontrollierbarer Heftigkeit kommen.

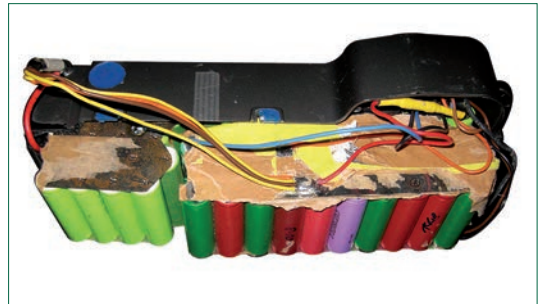
Bei der werkseitigen Konfektionierung der Batterien wurden die Zellenpole mit den Zellverbindern punktverschweißt (**Bild 1**).



**Bild 1:** Die Zellenpole sind über je 4 Schweißpunkte mit den Ableiterstreifen verbunden. Diese Technik setzt beim Verbinden weniger Hitze frei als Löten.

Im Reparaturfall ist man als Amateur meist auf Lötverbindungen angewiesen. Es ist nicht auszuschließen, dass bei unvollkommener Löttechnik die Zellen selbst beschädigt werden. Dies gilt vor allem für Lötvorgänge am hitzeempfindlichen Pluspol.

Hochgefährlich sind „vagabundierende“ Lötzinnpelchen, welche benachbarte Leiterstreifen kurzschließen können. Von eigenen Reparaturversuchen an E-Bike-Akkus ist daher abzuraten (**Bild 2**).



**Bild 2:** Es bleibt fragwürdig, ob dieser Batteriepack fachmännisch repariert wurde.

### Falsche Ladetechnik

Werden Akkus mit einem nicht für sie bestimmten Ladegerät aufgeladen, so ist nicht gewährleistet, dass ihre Vollladung rechtzeitig erkannt wird. In diesem Falle kommt es zu Überladung, die von einem intakten BMS verhindert werden sollte (so dieses nicht selbst durch das falsche Ladegerät zerstört oder in ihrer Funktion beeinträchtigt wurde). Selbst wenn eine Überladung nicht sofort zum Brand führt, wird die Batterie dadurch irreversibel geschädigt.

Allerdings sind bei modernen Elektrofahrrädern diesbezüglich einige Sicherheitsvorkehrungen getroffen worden. Dazu kommuniziert das Ladegerät mit dem BMS über (mindestens einen) zusätzlichen Signalanschluss. Nur wenn sich das Ladegerät mit dem richtigen Signalcode meldet, gibt das BMS die Ladung frei.

### Gefahrenzuwachs durch Parallelzellen

Fahrradakkus bestehen überwiegend aus Becherzellen der Größe 18650. Dieses Zellenformat verfügt derzeit über ein Kapazitätsspektrum von 2 bis 3,5 Ah. Es müssen also, um die heute üblichen Kapazitäten von 8 Ah bis 14 Ah zu erreichen, immer mehrere Zellen zu Zellenbänken parallel geschaltet werden (**Bild 1**).

Dies geschieht in den Akkupacks durch direktes Verschweißen der Ableiter ohne dazwischen geschalteten Sicherungsdraht, wie das etwa beim Batteriepack des Elektroautoherstellers Tesla der Fall ist (dort sind bis zu 10000 Zellen gleicher Größe verbaut).



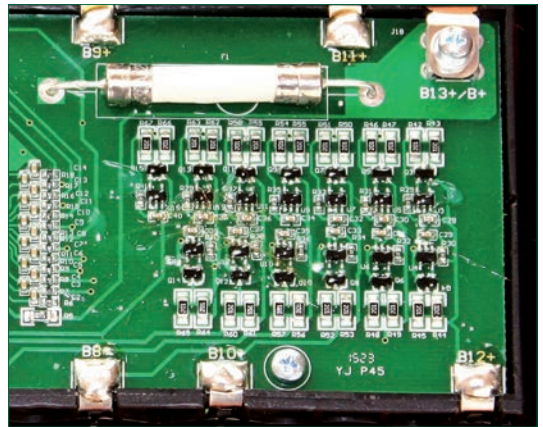
**Bild 1:** Teil eines Pedelec-Akkus. Links sichtbar die Parallelverbindung von 5 Pluspolen. Die parallelen 5 Minuspole in Bildmitte sind mit weiteren 5 Pluspolen in Reihe geschaltet. Der abgebildete Akku hat die Zellenkonfiguration 3s5p.

Ein interner Kurzschluss einer einzelnen Zelle kann hier bewirken, dass sich nicht nur die Energie dieser einen Zelle, sondern die der gesamten Parallelschaltung entlädt. Bei Qualitätszellen ist es glücklicherweise unwahrscheinlich, dass bei einzelnen Zellen interne Kurzschlüsse auftreten.

### Extern verursachte Kurzschlüsse

Wird der Akku direkt an den Klemmen kurzgeschlossen, muss das BMS den Strom wirksam begrenzen oder besser ganz verhindern. Für den ungünstigsten Fall ist eine 25-A-Schmelzsicherung eingebaut. Sie darf auf keinen Fall entfernt und / oder überbrückt werden (**Bild 2**).

Große Vorsicht ist geboten, wenn das Batteriegehäuse geöffnet oder großflächig beschädigt wurde. Die nunmehr freiliegenden Leiterbahnen dürfen auf keinen Fall mit leitenden Gegenständen in Berührung kommen. Kurzschlussströme von mehreren hundert Ampere wären möglich.



**Bild 2:** Teil einer BMS-Platine eines 48V-Akkus mit 13 Balancereinheiten (Mitte rechts) und Schmelzsicherung (oben)

### 8.8.2 Brandschutzvorkehrungen

Entgegen verbreiteter Sensationsmeldungen sind Akkubründe auch bei Lithium-Ionen-Akkus äußerst selten. Auch sind seit Jahren keine Fälle mehr bekannt geworden, bei denen sich Akkus nachweislich ohne äußere Einwirkung oder vorausgegangene grobe Behandlungsfehler entzündet haben. Zur Ängstlichkeit oder gar Panik besteht kein Anlass.

Gleichwohl sollte man dafür sorgen, dass im Brandfalle die Flammen nicht auf brennbare Gegenstände in der Umgebung übergreifen können. Also: Auf feuerfester Unterlage und nicht in der Nähe brennbarer Gegenstände laden und lagern. Wenn verdächtige Erscheinungen wie starke Erwärmung, Knistern im Inneren oder gar Rauchbildung beobachtet werden, wenn immer möglich, den brennenden Akku umgehend auf eine freie Fläche befördern. Entstehende Gase nicht einatmen!

Sand gilt als bestgeeignetes Löschmittel. Zwar kommt in Lilon-Zellen im Normalfall (!) kein metallisches Lithium vor, sodass auch Wasser als Löschmittel geeignet sein kann.

Dies gilt allerdings nur solange, wie der Akku nicht durch Fehlbehandlung vorgeschädigt ist. In diesem Fall kann sich metallisches Lithium außerhalb der Elektroden abgeschieden haben, das dann (wie alle Alkalimetalle) bei Wasserkontakt heftig reagiert.

Es sei wiederholt: Warum sollte ein wie oben beschrieben sachkundig gepflegter Akku überhaupt brennen?

### 8.8.3 Entsorgung

Akkus sind aufgrund ihrer Inhaltsstoffe in jedem Falle Sondermüll und dürfen daher nicht in den normalen Müllkreislauf gelangen.



**Bild 1: Akku mit Behandlungs- und Entsorgungshinweisen**

In Deutschland ist der Handel verpflichtet, ausgediente Akkus zurückzunehmen und einer ordnungsgemäßen Entsorgung zuzuführen. Auch kommunale Entsorgungsbetriebe nehmen Altbatterien an (**Bild 1**).

Leider steckt das Lithium-Zellen-Recycling noch in den Kinderschuhen. Es gibt jedoch eine interessante Zweitverwertung von Lilon-Zellen: Akkus, die für mobile Anwendungen nicht mehr energiereich genug sind, können in stationären (Solar-) Stromspeichern, bei denen die Energiedichte nur noch von untergeordnetem Interesse ist, noch viele Jahre gute Dienste leisten.

## 8.9 Ladegerätetechnik

Wer ein Pedelec erwirbt, bekommt gewöhnlich ein passendes Ladegerät mitgeliefert (**Bild 2**). Es handelt sich dabei üblicherweise um ein sog. Netzladegerät, das an eine 230-V-Steckdose angeschlossen wird. Von seiner elektrischen Auslegung ist es gewöhnlich so dimensioniert, dass ein leerer Akku damit in 2 bis 6 Stunden aufgeladen werden kann. Damit erreicht man bei Lilon-Akkus einen guten Kompromiss zwischen Ladegeschwindigkeit und Lebensdauer.



**Bild 2: Ladegeräte verschiedener Markenhersteller**

Das Ladegerät ist dabei nicht nur Energielieferant. Es muss sich bei modernen Systemen dem BMS gegenüber „legalisieren“ und – wenn akzeptiert – einen hinreichend großen Ladestrom (z. B. 4 A) bei passender Systemspannung (z. B. 42 V) liefern.

Die tatsächliche Stromhöhe bestimmt zu Ladefang die Elektronik (Anfangsladestrom), zum Ladeschluss hin sorgt die ansteigende Akkuspannung für ein kontinuierliches Absinken des Stroms. Die Ausgangsspannung des Netzgerätes muss groß genug sein, um ein vollständiges Aufladen der Batterie auf SOC 100 % zu erlauben.

Leider sind die Angaben auf den Typenschildern der einzelnen Geräte keineswegs einheitlich.

Manche Geräte geben die Nennspannung des Akkus an (z. B. 36 oder 37 V DC), andere die maximale Ladespannung (z. B. 42 V DC). Beide Angaben können denselben Akku kennzeichnen. Benötigt werden tatsächlich 42 V, um einen Akku aus 10 Serienzellen voll aufladen zu können.

Akkus aus 13 Serienzellen sind gewöhnlich mit 48 V Nennspannung klassifiziert. Ihre volle Ladespannung liegt dann bei 54,6 V. Nur noch selten anzutreffen sind heute Akkupacks aus 7 Serienzellen. Ihre Nennspannung liegt bei 25,2 V. Die maximale Ladespannung beträgt 29,4 V.

Es handelt sich bei den aktuellen Ladegeräten ausnahmslos um sog. Schaltnetzteile. Sie richten die 230-V-Netzspannung gleich, zerhacken diese Gleichspannung elektronisch, um sie dann via Transformator auf das benötigte niedrigere Spannungsniveau zu bringen (Bild 1). Weil sie mit hoher Frequenz (> 20 Kilohertz) arbeiten, können die Geräte kompakt und leicht gebaut werden. Der Wirkungsgrad solcher Schaltregler liegt üblicherweise bei 85 % bis 90 %. Die Kosten einer Batterieladung liegen damit trotz ständig steigender Energiepreise im Cent-Bereich.

Der Fahrradkunde wünscht sich ein kompaktes und leicht transportables Ladegerät.

8.9.1 Ladeüberwachung

Ladegeräte für Lilon-Akkus können ohne ein Batterieüberwachungssystem ihre Aufgabe nicht betriebssicher erfüllen. Sie arbeiten daher eng mit dem BMS zusammen, das neben der Strom- und Temperaturüberwachung des Akkus auch das Zellenbalancing sicherstellt. Denn es ist nicht garantiert, dass alle Zellen in einer Reihenschaltung, obwohl sie vom gleichen Ladestrom durchflossen werden, auch immer den gleichen Ladezustand haben. Ursache hierfür sind produktions- oder nutzungsbedingte kleine Kapazitätsstreuungen, wie sie auch bei hochwertigen Zellen nicht vollständig auszu-

schließen sind. Kritisch können solche Unterschiede vor allem in der Endphase der Ladung werden, wenn einzelne Zellen die Ladeschlussspannung von 4,2 V vor den anderen erreichen. In diesem Fall kann die Summenspannung, wie die Tabelle zeigt, durchaus stimmen. Da die Zellen 1 und 2 noch nicht ganz vollgeladen sind, kann Zelle 10 dabei bereits einen kritischen Überladezustand annehmen, ohne dass sich dieser in der Gesamtspannung widerspiegelt.

Zellennummer	Zellenspannung
1	4,18 V
2	4,17 V
3	4,20 V
4	4,20 V
5	4,20 V
6	4,20 V
7	4,20 V
8	4,20 V
9	4,20 V
10	4,25 V
Gesamtbatterie	42,00 V

Hier setzt das Zellenbalancing ein. Stellt das BMS fest, dass einzelne Zellen die Ladeschlussspannung überschreiten, werden sie über Transistoren und Widerstände gezielt entladen, und zwar solange, bis auch die spannungsarmen Zellen (im Beispiel 1 und 2) aufgeholt haben. In dieser Phase kann der Ladestrom reduziert werden, um die Entladewiderstände nicht zu überlasten.

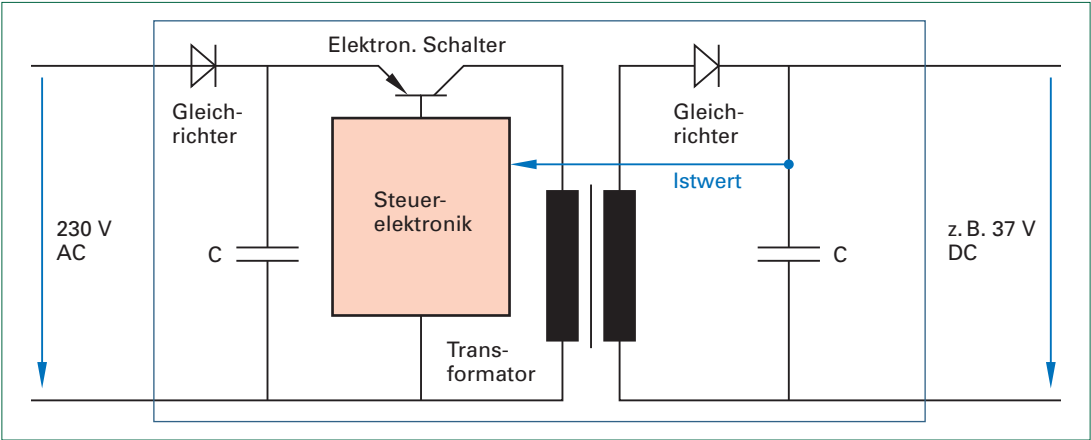


Bild 1: Schemaschaltnetzteil



Für das Balancing muss die BMS mit allen einzelnen Zellen in Verbindung stehen. Die Batterien verfügen deshalb über Einzelzellenabgriffe (Bild 1 und 2).

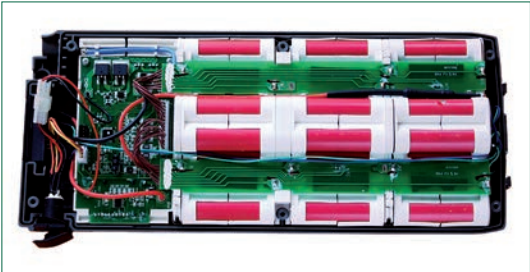


Bild 1: Einzelzellenabgriffe über Platinen geführt

Dank riesenhafter Produktionszahlen stehen diese zu einem unschlagbar günstigen Preis und in höchster Qualität zur Verfügung. Als nachteilig wird der hohe Aufwand an Verbindungstechnik empfunden. Mit größeren Zellen wäre zudem eine verbesserte Energiedichte zu erreichen.



Bild 3: Prismatische Lilon-Großzelle aus chinesischem Labor. Daten:  $C = 30,5\text{ Ah}$ ,  $R_i = 0,63\text{ m}\Omega$

8.10 Ausblicke

Auch in den nächsten Jahren werden Elektrofahräder weiterhin von Lithium-Ionen-Akkus mit Energie versorgt werden. Derzeit dominieren eindeutig noch die Rundzellen der Größe 18650, die ursprünglich für Laptop- und Power-tool-Anwendungen konzipiert wurden.

Andere Verheißungen überlegener alternativer Energiespeichertechnologien entbehren derzeit noch jeder wissenschaftlich abgesicherten Grundlage. Dennoch bieten Batterien, die als einen von zwei Reaktionspartnern den Sauerstoff der Umgebungsluft verwerten, langfristig noch spannende Perspektiven.

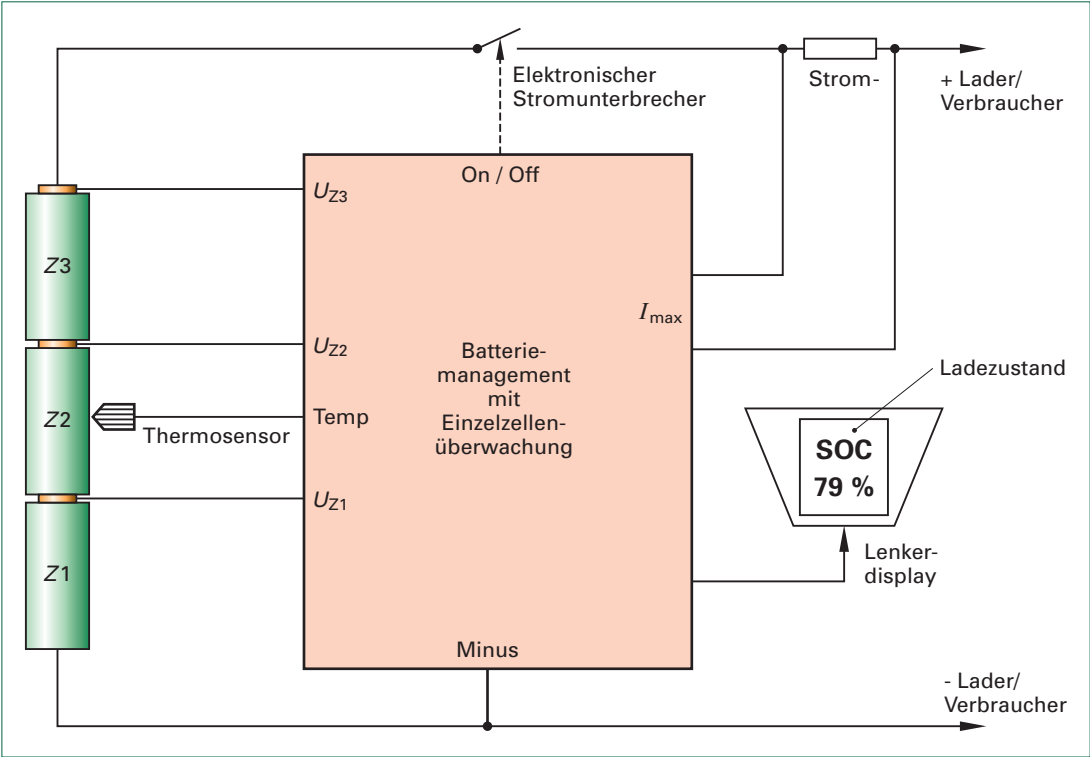
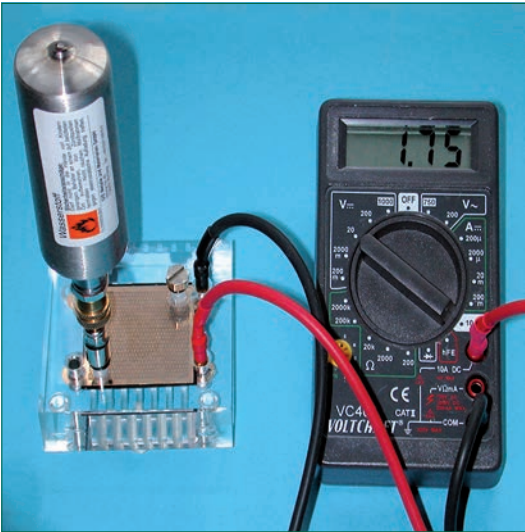
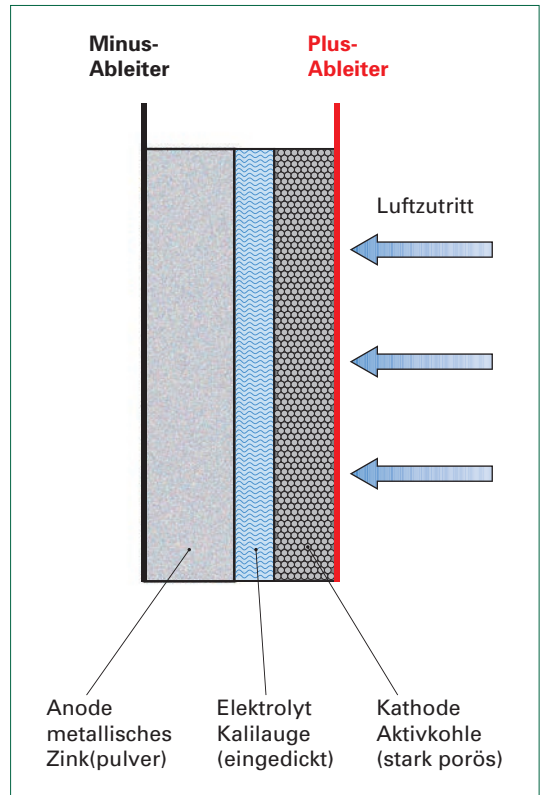


Bild 2: Batteriemanagementsystem (BMS) mit Einzelzellenüberwachung

Es gibt sie auch schon beispielsweise in Form von Brennstoffzellen (**Bild 1**). Diese konnte sich aber wegen des vergleichsweise komplizierten Aufbaus und der weiterhin ungeklärten Wasserstofflogistik selbst bei der Automobiltechnik als Serienprodukt nicht durchsetzen.



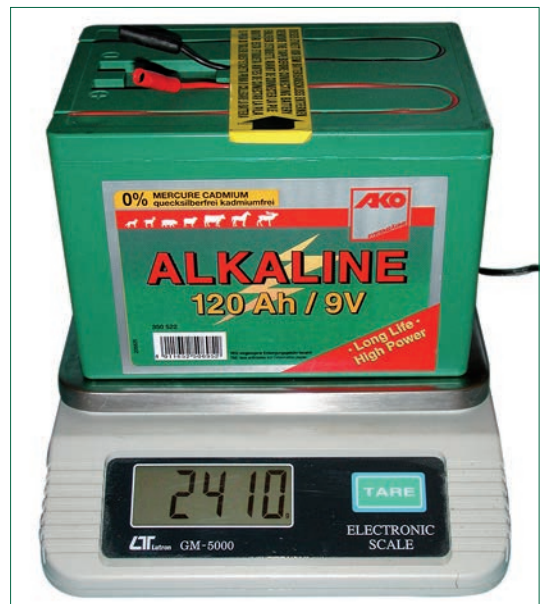
**Bild 1: Versuchsanordnung mit Brennstoffzelle**



**Bild 2: Funktionsprinzip einer Luft-Zink-Zelle**

Auf ähnlicher Basis arbeitet die sog. Zink-Luft-Batterie (**Bild 2**). Bisher gelang es aber lediglich, Primärzellen dieser Technologie in Serie zu bauen. Sie werden beispielsweise bei elektrischen Weidezäunen auf Pferdekoppeln eingesetzt. Eine Wiederaufladbarkeit ist möglich, wenn das umgesetzte Metall gegen frisches ausgetauscht wird, was einer Brennstoffzelle mit einem festen Brennstoffanteil gleichkäme.

Eine elektrische Wiederaufladung wäre fraglos anwenderfreundlicher, scheitert aber bisher an der Dentritenbildung, wie sie fast allen Systemen mit rein metallischen Elektroden eigen ist. Mit Zink-Luft-Batterien sind derzeit Energiedichten zu erreichen, welche die der Lilon-Zellen um das 2- bis 3-fache übersteigen. So bringt es die in **Bild 3** dargestellte Weidezaunbatterie bei bestimmungsgemäßer Verwendung auf eine spezifische Energie von nahezu 450 Wh/kg.



**Bild 3: Zink-Luft-Batterie, derzeit noch nicht wiederaufladbar.**

Mehr noch versprechen Zellen auf Lithium-Luft-Basis. Hier wurden auch schon wiederaufladbare Labormuster getestet. Das ungelöste Problem dieser elitären Technologie scheint derzeit an der geringen Alterungsbeständigkeit zu liegen. Allgemein verdient festgehalten zu werden, dass auch bei Batterien vom Reagenzglas bis hin zur Produktionsstraße ein langer Weg zurückzulegen ist.

Bei elektrischen Modellantrieben wird seit einigen Jahren schon mit sogenannten Hochvolt (HV)-Lithium-Polymerzellen experimentiert. Sie vertragen aufgrund veränderter Elektrolytmischungen eine Ladespannung von bis zu 4,35 V. Damit liegt auch die Entladespannung auf höherem Niveau, sodass von 3,8 bis 3,9 V Nennspannung (statt bisher 3,6 bis 3,7 V) ausgegangen werden darf. Dies scheint ein erfolgversprechender Weg bei der Weiterentwicklung der klassischen Lilon-Zellen zu sein. Derzeit krankt der Hochvolt-Zellentyp allerdings noch an einer unbefriedigenden Lebensdauer.

Neue Elektrodenmaterialien seitens der Zellenanode werden seit etwa 10 Jahren in den

Entwicklungszentren getestet. Hier geht es um besonders dünne Graphitschichten (sog. Graphene) oder auch darum, das derzeit als Anodenmaterial verwendete Graphit durch schlanke, flexible Siliziumfäden zu ersetzen, was zu einer Mehr-als-Verdopplung der vorhandenen Speicherkapazität sowie zu einer noch höheren Lebensdauer führen könnte. Ziel der Weiterentwicklung ist zudem eine größere Ladegeschwindigkeit der Batterien. Mit weiter miniaturisierten Ladegeräten wird es damit möglich und attraktiv sein, auch einmal zwischendurch den Akku nachzuladen.

Bei dem Balanceakt, hohe Leistung mit hoher Energiedichte und einem ausgedehnten Zyklenleben zu kombinieren, wird vorerst der Entwicklung eines weiter verfeinerten Batteriemanagements größte Bedeutung angemessen. Mit anderen Worten: Es ist davon auszugehen, dass mit der Leistung der Batterien auch deren Empfindlichkeit weiter wachsen wird, was nur durch eine entsprechende Überwachungselektronik beherrschbar ist.



Bild 1: S-Pedelec mit Solarzellen im Anhänger