

ELEKTRISCH, ABER RICHTIG

DIE BATTERIE – QUELLE DER LEISTUNG

Nach der Beleuchtung von Motor und Regler wollen wir uns in dieser und der folgenden Kolumne mit dem letzten Element des Antriebsstrangs befassen: der Batterie. In der heutigen Folge gehen wir auf die allgemeinen Aspekte der Batterie ein, um in der nächsten Folge die spezifischen Fragestellungen der aktuell im Modellbau eingesetzten Lithium-Technologie zu klären.

In der Umgangssprache dient „Batterie“ als Oberbegriff für Primärzellen (Einwegzellen) und Sekundärzellen (wieder aufladbar). Sekundärzellen werden dabei auch als Akku (Akkumulatord) bezeichnet. Werden Einzelzellen zusammengeschaltet, entweder in Reihenschaltung (zur Steigerung der elektrischen Spannung) oder aber in Parallelschaltung (zur Steigerung der nutzbaren Kapazität) spricht man von Batterie-, beziehungsweise Akku-Packs.

Bereits im Jahr 1780 bemerkte der italienische Arzt Luigi Galvani, dass ein Froschbein, das in Kontakt mit Kupfer und Eisen kommt, immer wieder zu zucken beginnt. Das elektrische Prinzip eines galvanischen Elements war geboren. Alessandro Volta hat im Jahre 1800 das erste funktionierende galvanische Element und damit die erste Batterie in Form der Volta'schen Säule der Öffentlichkeit vorgestellt. Es folgte stetig eine konstruktive Verbesserung der Nassbatterien bis hin zu den heutigen Trocken-, beziehungsweise Gel-Batterien.

Das Grundprinzip der elektrochemischen Redox-Reaktion (Reduktion-Oxidation) bleibt seit Volta über die Jahre stets dieselbe. Jede Batterie, beziehungsweise jedes galvanische Element speichert Energie in chemischer Form. Diese kann bei Bedarf in elektrische Energie umgewandelt werden. Die elektrische Energie entsteht typischerweise durch elektrochemische Reduktion und Oxidation an den Elektroden.

Heutige Batterien bestehen meist aus folgenden vier Bestandteilen:

- Die anode oder negative Elektrode gibt bei der Entladung durch die elektrochemische Reaktion freie Elektronen ab (Oxidation). Diese fließen über den externen Stromkreis zum Plus-Pol.
- Der Elektrolyt transportiert die in der Batterie entstandenen positiv geladenen Ionen von der Anode zur Kathode.
- Die Kathode oder positive Elektrode nimmt die



extern eintreffenden Elektronen auf und lagert die angezogenen Ionen ein (Reduktion).

- Der optionale Separator isoliert die positive und negative Elektrode, verhindert einen direkten Kontakt und ist für die Ionen durchlässig.

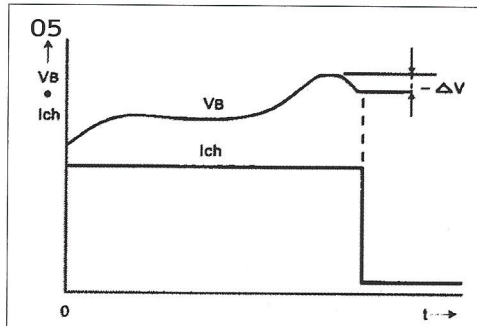
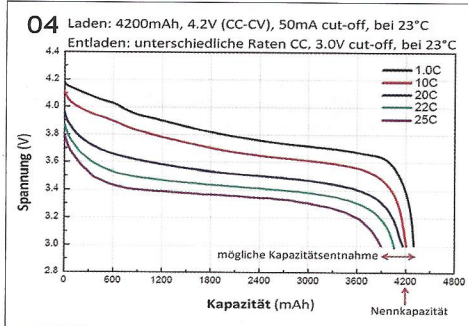
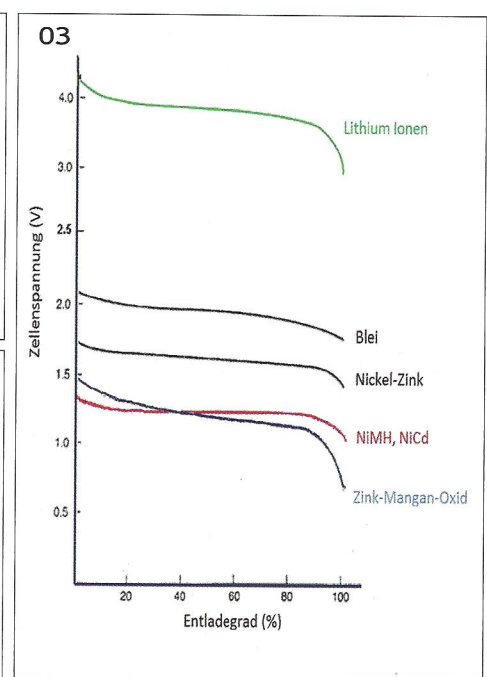
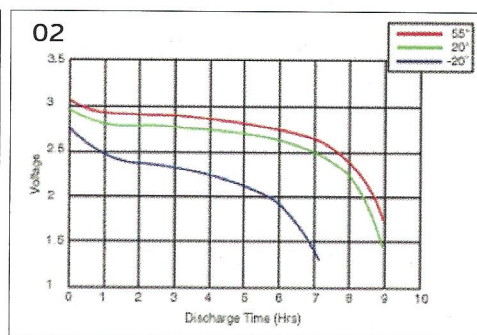
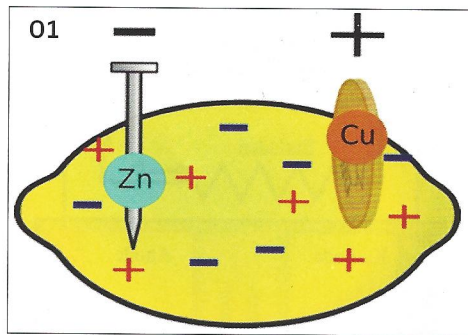
Obwohl die Elektronen über den externen Stromkreis (= Verbraucher) von Minus- zum Plus-Pol wandern, fließt der von uns gemessene Strom vom Plus zum Minus. Dieser verwirrende Umstand gründet in der langläufigen Ansicht, dass die Elektronen die Stromträger sind. In der Physik und der Elektrotechnik wird der Stromfluss definiert als Richtung, in die sich die positive elektrische Ladung bewegt, also entgegengesetzt dem Elektronenfluss.

Beim Ladevorgang eines Akkus wird der chemische Prozess der Entladung wieder rückgängig gemacht. Die Chemie wird in ihre ursprüngliche Form gebracht und dabei die Energie wieder in den Akku „gepumpt“.

Treten zwei unterschiedliche Metalle elektrisch leitend miteinander in Kontakt, entsteht eine elektrochemische Spannungsreihe. Die verwendeten Materialien der Anode und Kathode (auch Redox-Paar) bestimmen dabei die Nennspannung der Batterie. Dies kann mit einem ein-

fachen Experiment gezeigt werden: die „Zitronen-Batterie“. Wir benötigen Zink (verzinkter Nagel), Kupfer (Geldstück) und eine Zitrone. Der Nagel und das Geldstück sind unsere Elektroden und werden in die Zitrone gesteckt. Der Zitronensaft ist unser Elektrolyt. Einen Separator benötigen wir nicht, da die beiden Elektroden räumlich getrennt sind. Zink mit dem Spannungspotential von $-0,76$ Volt agiert als Anode und der Kupfer mit $+0,34$ Volt als Kathode. Dies ergibt ein theoretisches Spannungspotential von $1,1$ Volt. Sie werden anfänglich etwa $0,5$ Volt messen, da sich die Ionen nur langsam in der Zitrone bewegen. Die Bewegungsfreiheit wird sich aber verbessern. Warten Sie eine Weile und die Spannung wird ansteigen.

In der Folge werden wir uns der Einfachheit halber auf die im Modellbau relevanten Batterietypen beschränken. Für den Modellflug ist insbesondere die Energiedichte von hohem Interesse. Ein leichterer Akku führt zu geringerem Abfluggewicht, geringere Energie wird benötigt, beziehungsweise die Flugleistungen werden verbessert. Die schweren Nickel-Typen wurden zwischenzeitlich von den wesentlich leichteren Lithium-Typen als Antriebsakku vollständig verdrängt. Eine Batterie kann auf unterschied-



01 | Das im Text erwähnte Zitronenbatterie-Experiment (Quelle: thenakedscientists.com) **02** | Auswirkung Temperatur auf R_i (Quelle: mpoweruk.com) **03** | Nennspannungen unterschiedlicher Zellchemie **04** | Nennkapazität und Peukert-Effekt **05** | Ladekurve eines NiCd/NiMH mit Delta-Peak Abschaltung

lichste Arten charakterisiert werden: „Long Life“, „High Capacity“, „Deep Cycle“, „C-Rate“, „High Discharge“ oder „Fast Charge“ sind nur einige marketing-technisch ausgeschaltete Begriffe. Leider fehlen die nötigen Standards, um Batterien einheitlich zu charakterisieren. Damit ist es oft sehr schwer für den Endanwender, wegen der fehlenden Vergleichbarkeit die korrekte Wahl zu treffen. Wir wollen in der Folge auf die gängigsten jedoch nicht abschließenden Spezifikationen und deren Bedeutung eingehen.

Die Zellchemie mit ihrer elektrochemischen Charakteristik bestimmt die Nennspannung der Batteriezelle. Daher haben zum Beispiel NiMH-Akkus eine tiefere Nennspannung pro Zelle als Lithium-Polymer (1,2 gegenüber 3,7 Volt). Die effektiv gemessene Spannung U an den Batteriekontakten ist abhängig von der Belastung (aktuell fließender Strom) und dem Innenwiderstand. Der Innenwiderstand R_i (auch Impedanz) ist maßgeblich abhängig von den physikalischen Eigenschaften des Elektrolyts. Je kleiner die Granularität des elektrolytischen Materials, desto geringer der Innenwiderstand. Die Granularität wird durch den Hersteller festgelegt im Mahlprozess. Der Innenwiderstand ist nicht etwa konstant, sondern steigt zusätzlich mit abnehmender Temperatur, abnehmendem Ladezustand und zunehmendem Alter der Zelle.

Flache Entladekurven liefern eine gleichmäßigere Leistung als stärker abfallende. Insbesondere bei Zellen mit mäßigem Innenwiderstand R_i und hohen Entladeströmen I ist die Leistungsabgabe gegen Ende eines Entladezyklus bescheiden. Der Strom (I) fließt durch den Innenwiderstand und erzeugt über dem Innenwiderstand einen Spannungsabfall $U_i = I * R_i$, der die verfügbare Spannung an der Batterie mindert – daher rührt der Spannungseinbruch jeder Batterie bei hoher Belastung.

Den Temperatur-Effekt kennen wir doch alle. Die Akkuleistung kann bei kalten Temperaturen dramatisch einbrechen – aber warum? Der Betriebstemperaturbereich einer Batterie definiert sich am unteren Ende durch Kristallisierung oder gar Einfrieren des Elektrolyts. Das obere Ende wird durch den Zusammenbruch der Zellchemie mit permanenter Schädigung oder gar einem Thermal Runaway begrenzt. Zwischen diesen beiden Extremen wird die Leistungsabgabe mit zunehmender Temperatur besser, da die Chemie reaktionsfreudiger wird und damit R_i abnimmt. Allerdings schreitet die Alterung des Akkus mit höheren Betriebstemperaturen wesentlich schneller voran.

Die in der Zelle gespeicherte elektrische Ladung wird als (Nenn-) Kapazität bezeichnet und in der Dimension der Amperestunde (Ah, mAh) ausgedrückt. Die Festlegung der Nennkapazität bezieht sich IMMER auf einen definierten Entladestrom und nimmt je nach Akkutyp mit höheren Strömen unterschiedlich stark ab! Wird zum Beispiel ein Blei-Akku statt in wenigen Minuten über mehrere Stunden entladen, kann bis zur doppelten Kapazität entnommen werden (vgl. Peukert). Ferner nimmt die verfügbare Kapazität auch mit zunehmender Alterung, beziehungsweise Zyklen ab.

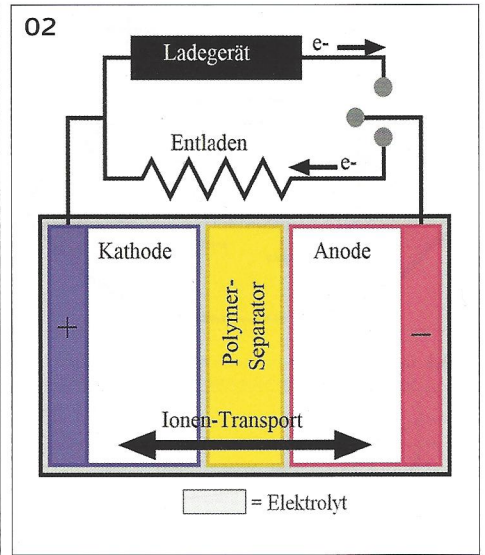
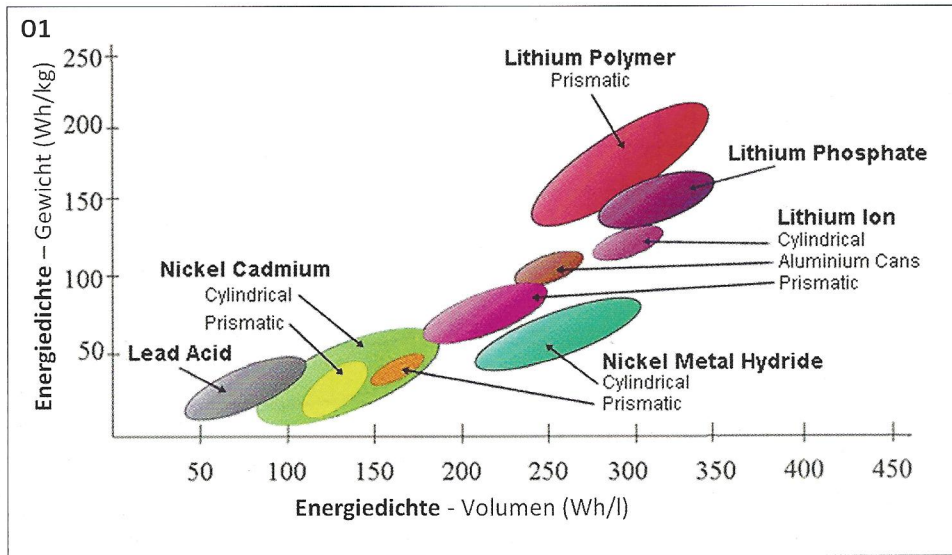
Das Entlade-/Ladevermögen eines Akkus wird im Modellbaubereich als C-Rate angegeben und ist ein Maß für den maximalen Strom (z.B. max. Strom = C-Rate * Kapazität). Ein 1.000-mAh-20C-Akku kann somit mit 20 Ampere entladen werden. Durch die fehlende Normierung ist der Vergleich auf Basis der „undurchsichtigen“ und somit oft individuell festgelegten C-Rate ungeeignet. Die C-Rate kann vom Hersteller auf unterschiedlichster Basis „frei“ definiert werden (maximal erlaubter Spannungseinbruch, Entladeschluss Temperatur oder 80 Prozent Kapazitätsentnahme) möglich. Damit muss mit

unterschiedlich publizierten C-Raten bei verschiedenen Herstellern gerechnet werden, trotz vergleichbarer effektiver Leistungsabgabe.

Die Peukert-Gleichung zeigt sehr schön, wie sich die verfügbare Kapazität bei unterschiedlicher Belastung eines Akkus ändert. Ein Beispiel: Auf einem Akkusteststand wird ein 4,2-Ah-Lithium-Akku konstant mit 105 Ampere (= 25C) vollständig bis zur Entladeschlussspannung (3,0 Volt) entladen. Die Entladung dauert 106 Sekunden. Dabei können nicht etwa 4.200 Milliamperestunden entnommen werden, sondern lediglich 3.920 Milliamperestunden. Daraus lässt sich nun eine Peukert Konstante von $n = 1,051$ errechnen.

Die Peukert-Konstante ist direkt abhängig vom Innenwiderstand und lässt Vergleiche über Hersteller hinweg zu. Sie gibt Auskunft über die Leistungsfähigkeit eines Akkus bei einer Hochstromentladung. Hohe Ströme bedeuten mehr Verlust über dem Innenwiderstand und damit eine geringere verfügbare Kapazität. Ein Wert nahe bei Eins zeigt eine hohe Zellengüte. Je höher die Peukert-Konstante, umso geringer ist die Zelle hochstromfähig (Lithium: $\sim 1,05$, Nickel $\sim 1,1$, Blei $\sim 1,3$).

Der Einfluss der Peukert-Gleichung kann sehr schön bei Entladediagrammen mit unterschiedlichen Strömen (C-Raten) beobachtet werden. Ferner ist gut erkennbar, dass die Nennkapazität von 4.200 mAh dieser Zelle auf der Basis eines Entladestroms von 10C festgelegt wurde. Diese Methode eignet sich leider wenig für den Modellbau-Alltag. Sie birgt neben einer potentiellen und irreparablen Tiefentladung auch das Fehlen einer Infrastruktur für Hochstromentladung. Ein Vergleich über Hersteller hinweg kann einfacher auf der empirischen True-C Berechnung basierend auf dem Innenwiderstand erfolgen. Darauf wollen wir in der nächsten Ausgabe zurückkommen.



03

Akkutyp	Energiedichte Ladewirkungsgrad	Nennspannung Lade-/Entladeschluss ¹⁾	Lagerung Selbstentladung	Ladeverfahren
NiCd Nickel-Cadmium	40-60 Wh/kg 70%	1.2V ~1.5 / 1.0...0.9V	~ 40% @ 20°C ~ 10% / Monat	CC, Delta-Peak Memory Effekt
NiMH Nickel-Metallhydrid	60-110 Wh/kg 70%	1.2V ~1.5 / 1.0...0.9V	~ 40% @ 20°C ~ 15% / Monat	CC, Delta-Peak Memory Effekt
LiCoO2 Lithium-Cobalt-Oxid	120-210 Wh/kg 90%	3.6V 4.2V / 3.2...3.0V	~ 60% @ 20°C < 2% / Monat	CC-CV ohne Memory Effekt
LiPo Lithium-Polymer	140-260 Wh/kg 90%	3.7V 4.2V / 3.2...3.0V	~ 60% @ 20°C < 2% / Monat	CC-CV ohne Memory Effekt
LiFePO4 Lithium-Eisenphosphat	80-140 Wh/kg 94%	3.3V 3.6V / 2.9V	~ 60% @ 20°C < 2% / Monat	CC-CV ohne Memory Effekt
Li-S Lithium-Schwefel	~350-500Wh/Kg -	2.2V 2.5V / 1.7V	-	CC-CV noch in Entwicklung

1) Entladeschlussspannung im Leerlauf (ohne Last)

01 | Energiedichte unterschiedlicher Zellchemie (Quelle: mpoweruk.com) **02** | Prinzipieller Aufbau einer Batterie (Quelle: wikipedia.com) **03** | Typische Batterietypen mit Einsatzgebiet Modellbau

Der Energieinhalt einer Batterie wird in Wattstunden (Wh) angegeben, wird aber nicht immer ausgewiesen. Weit mehr trifft man auf Datenblätter die Energiedichte (Wh/kg) an, was für uns Modellbauer von großem Interesse ist. Salopp gesagt: Je höher der Wert, umso leichter die Batterie bei gleicher Kapazität oder mehr Kapazität bei gleichem Gewicht.

Die Selbstentladerate gibt Auskunft darüber, wie schnell sich eine Batterie durch chemische Vorgänge innerhalb der Zelle entlädt, obwohl sie nicht gebraucht wird. Die Selbstentladerate ist nicht nur von der Zellenchemie, sondern auch von der Lagertemperatur abhängig (z.B. LiPo <2 Prozent pro Monat bei 20 °C). Je geringer die Lagertemperatur, desto geringer die Selbstentladung. Aber Vorsicht: Gefahr der Kristallisierung.

Die Zyklenfestigkeit ist eine Schlüsselgröße für die Lebensdauer einer Zelle und definiert sich wie folgt: Anzahl Lade-/Entladezyklen unter kontrollierten Bedingungen (z.B. 10C bei 20 °C) bis die effektive Kapazität noch 80 Prozent der Nennkapazität beträgt. Vom Benutzer kaum bemerkbar, verschlechtert sich mit jedem Zyklus

die Zellchemie. Die Verschlechterung ist unvermeidbar und ist in der Volumenreduktion der aktiven Chemie bedingt. Sie geht einher mit einer steten Zunahme des Innenwiderstandes. Die Zyklenfestigkeit ist ein guter Vergleichsparameter. Allerdings lassen sich daraus keine direkten Rückschlüsse auf die zu erwartende Zyklenzahl in der aktuellen Anwendung ableiten, da insbesondere die Verwendung im Modellbau alles andere als «unter kontrollierten Bedingungen» erfolgt (ändernde Temperaturen, unterschiedliche Lade-/Entlade-Raten und Lade-/Entladungsgrad oder Tiefentladung).

Als Memory-Effekt wird der Kapazitätsverlust bezeichnet, der durch häufige Teilentladung auftritt. NiCd und NiMH unterliegen dem Memory-Effekt. Daher sollen sie stets einen vollständigen Entlade-/Ladezyklus durchlaufen. Lithium Batterien kennen keinen Memory-Effekt, wodurch Sie auch bei Teilentladung unmittelbar wieder geladen werden können.

Je nach Zellenchemie eines Akkus kommen unterschiedliche Ladeverfahren und Erkennung eines vollen Akkus zum Einsatz. NiCd/NiMH

Akkus werden mit einem konstanten Strom (CC = Constant Current) geladen. Ist der Akku voll, bricht die Spannung wieder ein (Delta-Peak), was das Ladegerät erkennt und den Ladevorgang beendet. Ein Lithium Akku wird erst mit einem konstanten Strom geladen. Beim Erreichen der Ladeendspannung wechselt das Ladegerät auf eine Konstante Ladespannung (CV = constant voltage). Dabei nimmt der Stromfluss mit zunehmender Ladung ab. Unterschreitet der Ladestrom einen vordefinierten Schwellenwert, wird der Ladevorgang beendet.

Die fundamentalen unterschiedlichen Ladeprogramme zeigen, wie wichtig die korrekte Einstellung des Ladegerätes ist, um unliebsame Überraschungen zu vermeiden. Dazu mehr in der nächsten Kolumne: Der Lithium Akku – Quantensprung für Modellpiloten. ■

Markus Müller, www.ecalc.ch