

ELEKTTRISCH, ABER RICHTIG

DER LITHIUM-AKKU – QUANTENSPRUNG FÜR MODELLBAUPILOTEN

Nach dem generellen Exkurs zum Thema Batterie in der vorigen Ausgabe, geht Markus Müller nun detailliert auf den Lithium-Ionen-Akku ein: Er befasst sich mit Fragestellungen der Typenvielfalt, dem Aufbau und der Funktionsweise.

In den 60er-Jahren tauchten auf dem Markt die ersten Zellen auf Basis von Lithium-Mangan-Oxid (LiMnO_2 ; heute noch als Knopfzelle bekannt) auf. Bereits Ende des Jahrzehnts wurde die Lithium-Thionyl-Chlorid marktreif, die bis heute zu den Spitzenreitern bezüglich Energiedichte (700 Wh/kg) gehört. Leider sind dies alles Primärzellen, also nicht wiederaufladbar und damit ungeeignet für unser Einsatzgebiet. Unwegsame Probleme mit dem hoch reaktiven Material Lithium führten dazu, das es weitere 20 Jahre dauern sollte bis erste Sekundär-Li-Zellen marktfähig wurden. Diesen fehlte es allerdings an Zyklenfestigkeit, und hochstromfähig waren sie schon gar nicht. In den 90er-Jahren war der Elektromodellflug fest im Griff von NiCd- und NiMH-Zellen, als man in der Li-Akku-Entwicklung endlich einen Weg fand, die Lithium-Atome geordnet in die Elektroden einzulagern, was mit dem Lithium-Ionen-Akku zum ersten Mal gelang. Seit dieser Zeit gilt der Lilon quasi als Oberbegriff für alle Lithium-Typen. In den späten 90er-Jahren tauchten dann auch die ersten Li-Akkus im Modellbau auf und ihr Siegeszug begann.

Der Li-Ion-Akku weist eine servicearme Chemie ohne Memory-Effekt auf, bei hoher Energiedichte und sehr geringer Selbstentladungsrate. Zugleich verfügt er über eine hohe Nennspannung von 3,6 Volt. Diese Grundeigenschaften machen diese Zellen zum meistverbreiteten Akku im Consumer-Bereich und sind aus unserem Alltag nicht mehr wegzudenken. Mit der Li-Ionen-Zelle wurde zudem ein Weg gefunden, die Sicherheitsprobleme des hochreaktiven Lithium-Metalls zu überwinden. Während dem gesamten Lade-Entladezyklus ist nie Lithium in metallischer Form vorzufinden. Die vorhandenen Lithium-Ionen sind immer in ein anderes Trägermaterial „einzubetten“ (vgl. Bild 1). Entweder in Metall-Mischoxid der Kathode (entladen) oder im Graphit der Anode (geladen).

Li-Ion-Akkus werden in unterschiedlichen Zellchemie-Varianten hergestellt, was ihnen die akzentuierten Eigenschaften verleiht (vgl. Bild 2). Der heute mit Abstand am häufigsten eingesetzte Antriebsakku im Modellbau ist der Li-

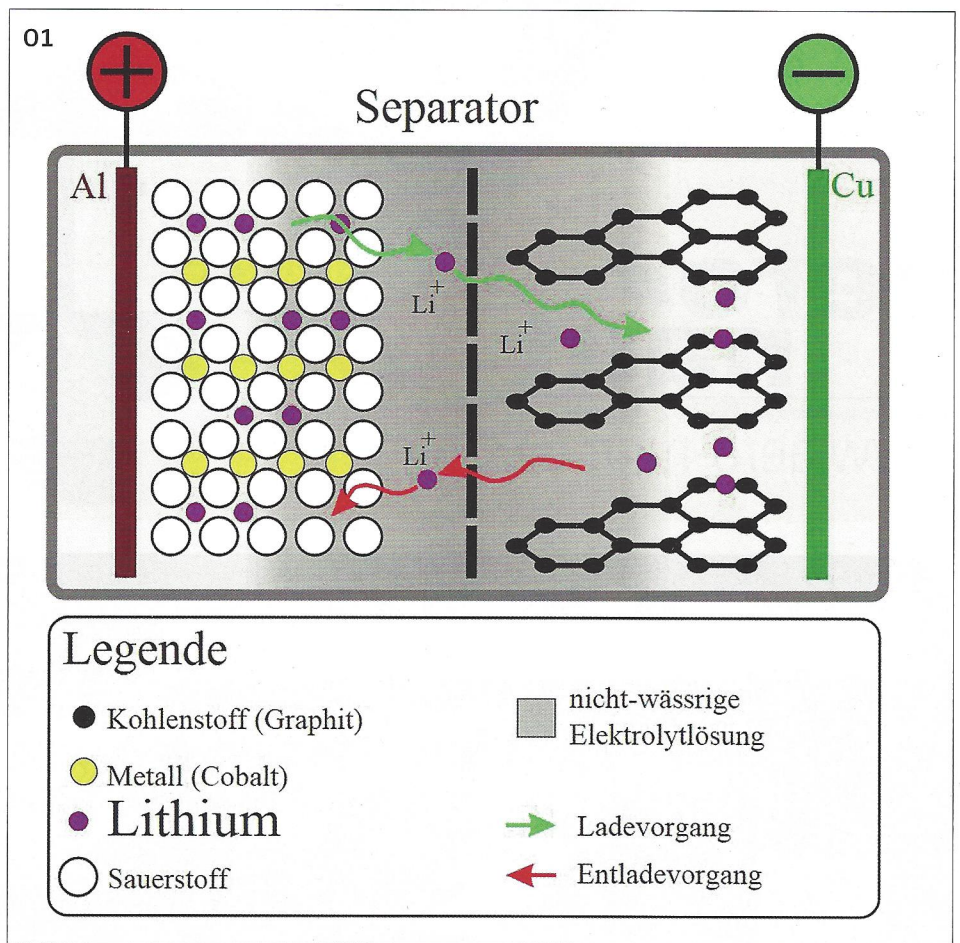


Bild 01 | Ionen-Einbettung einer Lithium-Kobalt-Oxid (LiCoO_2) Zelle.

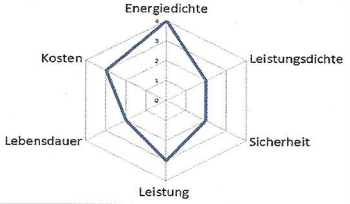
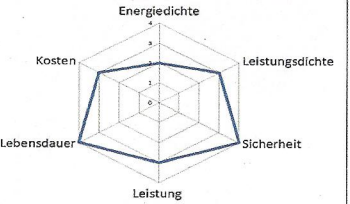
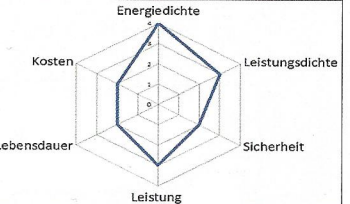
Quelle: wikipedia.org

thium-Ionen-Polymer-Akku (LiPo, LiPoly). Zusammen mit dem Brushless-Antrieb ist er verantwortlich für den Durchbruch des Elektromodellflugs. Es war der Quantensprung in der Akkutechnologie, der nicht nur Gewichtsersparnis sondern auch vernünftige Flugzeiten bei beeindruckender Flugleistung ermöglichte.

Analog zum Li-Ion-Akku weist auch der LiPo eine mit Lithium-Ionen durchsetzte, mit Graphit beschichtete Anode und eine Kathode mit Metalloxid auf. Jedoch enthält er keinen flüssigen Elektrolyten, sondern einen auf Polymerbasis. Der Elektrolyt ist damit eine feste bis gelartige Folie. Damit lassen sich preiswert Schichtfolien herstellen, auf welche die chemischen Bestandteile appliziert werden (vgl. Bild 3). Die Bauform

ist nicht nur auf die bis jetzt eingesetzten festen Zylinder beschränkt, sondern ermöglicht auch die im Modellbau üblichen prismatischen „Kissen“.

Beim Ladevorgang führt das Ladegerät dem Akku am Minuspol Elektronen zu. Die Anode wird negativ geladen und zieht die positiv geladenen Li-Ionen an. Diese wandern nun von der Kathode wieder zurück zur Anode und „nisten“ sich im Graphit ein. Vergewissern muss man sich vor jedem Laden, dass Ladestrom und Ladeschlussspannung, beziehungsweise das Ladeprogramm korrekt eingestellt sind. Obwohl Zellen mit bis zu 5-C-Ladestrom auf dem Markt sind, lege ich einen Ladestrom von 0,5 bis 1 C ans Herz für eine deutlich längere Lebensdauer.

Li-Varianten	Li-Kobalt-Oxid	Lithium-Eisenphosphat	Lithium-Polymer
Auch bekannt als	Lilon, LCO, Li-cobalt	LiFe, LFP	LiPo, LiPoly
Zellchemie	LiCoO ₂	LiFePO ₄	Li + Metall-Oxid Varianten
Eigenschaften: Energiedichte Leistungsdichte Sicherheit Leistung Lebensdauer Kosten			
Nennspannung	3.6V	3.3V	3.7V / HV Typ 3.8V
Laderate (maximal ¹)	0.5...1C	1C (4C)	0.5...1C (5C)
Ladeendspannung (maximal)	4.2V (4.25V)	3.6V (3.65V)	4.2V (4.25V) / HV: 4.3V (4.35V)
Entladerate bis (maximal ¹)	20C	30C	40C (70C)
min. Leerlaufspannung	>2.5V	>2.5V	>2.5V
Energiedichte	150-240Wh/kg	90-120Wh/kg	200-260Wh/kg
Zyklusfestigkeit	500-1000	1000-2000	bis 500
Thermal Runaway	150°C	270°C	80...150°C

1) Es muss mit verminderter Lebensdauer gerechnet werden
Dies sind Richtwerte. Beachten Sie daher IMMER die Herstellerangaben

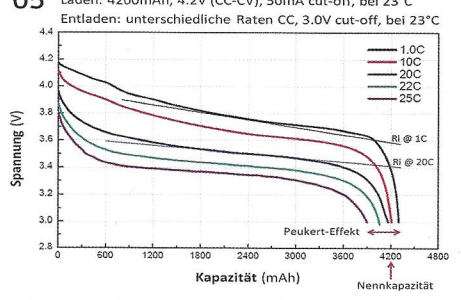
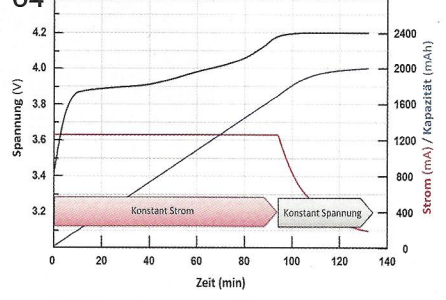


Bild 02 | Li-Varianten auf einen Blick **Bild 03** | Lithium-Folien. Quelle: Wikipedia.org **Bild 04** | Ladekurve CC und CV **Bild 05** | Die typische Entlade-Kurve einer 4.200-mAh-LiPo-Zelle

Lithium-Ladeprogramme laufen in zwei Phasen ab: Erst wird der Akku mit dem gewählten Ladestrom konstant geladen, bis die Akkuspannung circa 95 Prozent der Ladeschlussspannung erreicht (LiPo: ca. 4,1 Volt/Zelle). Nun wechselt das Ladegerät von einem Konstant-Strom- (auch CC) in ein Konstant-Spannungs-Programm (auch CV oder Sättigungsphase genannt), das die definierte Ladeschlussspannung für LiPo konstant auf 4,2 Volt/Zelle hält. Mit zunehmender Kapazität wird sich nun der Ladestrom reduzieren bis der Ladeschluss-Strom drei bis zehn Prozent des Ladestroms unterschritten wird. Der Lader beendet nun den Ladevorgang. Über den Balancer-Anschluss werden Zellen, die früher die Ladeschluss-Spannung erreichen, wieder entladen, um eine Angleichung aller Zellenspannungen zu erreichen und einen Zellendrift zu verhindern.

Die im Modellbau eingesetzten Li-Zellen weisen in der Regel keine integrierten Sicherheitsmechanismen auf, womit diese vom „intelligenten“ Lader sichergestellt werden müssen. Sprechen diese Mechanismen (tiefe/hohe Zellenspannung, große Zelldifferenzen, optionale Temperaturüberwachung) an, ist dies ein deutlicher Hinweis auf Probleme in der Zellchemie – nun ist Vorsicht geboten! Der Temperaturbereich zum Laden liegt zwischen 0 °C und 45 °C. Ausserhalb droht ein Lithium Plating (Bilden von metallischem Lithium). Wird ein Akku mit 2 C geladen, wird nicht etwa die Ladezeit halbiert. Durch den höheren Strom wird das Ladegerät

bedingt durch den Innenwiderstand des Akkus bei geringerem Ladegrad vom Konstant-Strom in das Konstant-Spannungsprogramm wechseln, womit die Sättigungsphase länger andauern wird.

Der Ladegrad kann anhand der Leerlaufspannung eines LiPo grob abgeleitet werden:

- 4,2 V = 100 % -> 3,9V = 70 %
- 4,1 V = 90 % -> 3,8 V = 60 %
- 4,0 V = 75 % -> 3,7 V = 50 %

Wird ein Li-Akku über Tage hinweg nicht eingesetzt, sollte er an einem kühlen Ort (nicht kalt!) bei 3,6 bis 3,8 Volt/Zelle gelagert werden. Längere Liegezeiten unter 3,5 – beziehungsweise über 3,9 Volt – führen zu nachhaltigen Beeinträchtigung der Zellenleistung. Das **Bild 5** zeigt eine typische Entlade-Kurve einer 4.200-mAh-LiPo-Zelle. Daran lassen sich nun die unterschiedlichsten in der vorigen Ausgabe besprochenen Effekte erkennen:

- Die Nennkapazität dieser Zelle basiert auf einer 10-C-Entladung. Es gilt zu beachten, dass die Nennkapazität selten auf der auf dem Akku abgedruckten C-Rate basiert.
- Den Peukert-Effekt beschreibt die entnehmbare Kapazität bei unterschiedlichen Entladeströmen. Je höher der Strom, umso geringer ist die entnehmbare Energie.
- Der Temperatur-Effekt führt zur Verringerung des Innenwiderstandes während der Entladung.

Je höher der Entladestrom, umso mehr erwärmt sich die Zelle und der Widerstand nimmt ab. Daher flachen die Entladekurven mit zunehmendem Strom ab. Anhand unterschiedlichen Entladekurven lässt sich der Innenwiderstand grob abschätzen ($R_i \sim \Delta U / \Delta I$).

Dies vermag ein Stückweit zu erklären, weshalb man ab und an den Eindruck gewinnt, dass nicht immer drin ist was drauf steht. Es ist alles eine Frage der Basis der gemachten Angaben.

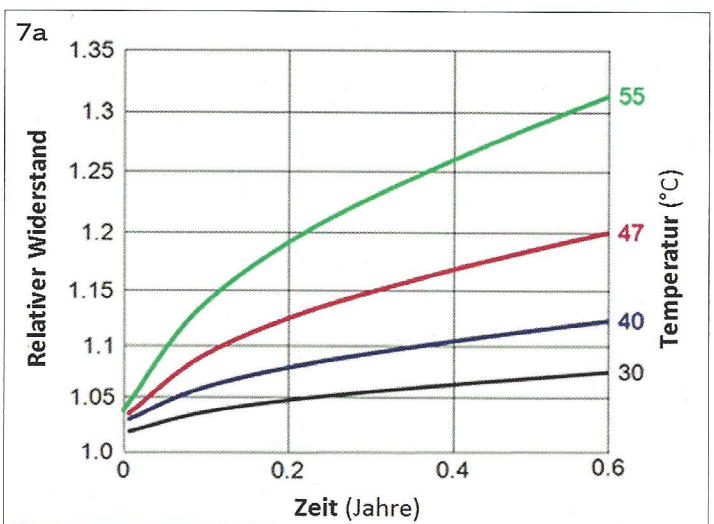
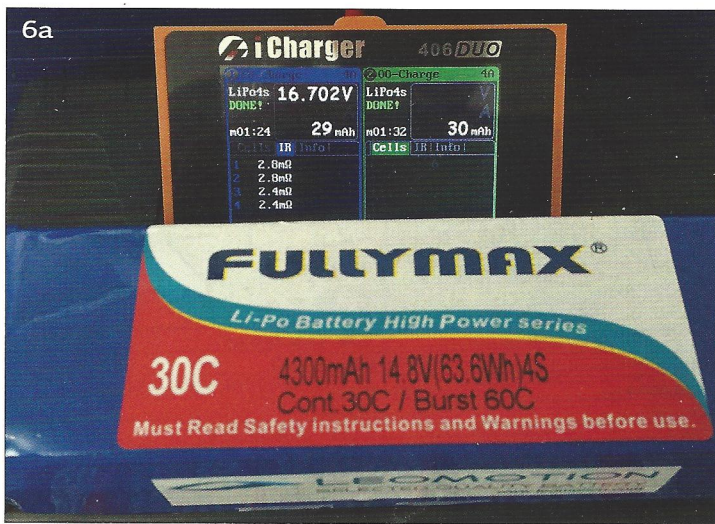
Der alltagstauglichste, kapazitätsunabhängige und qualitative Vergleich von Zellen über die unterschiedlichsten Hersteller hinweg, ist aus meiner Sicht der „True C“-Rate-Vergleich von Gille Wayne. Die Hochstromfähigkeit eines LiPos wird weitgehend durch seinen Zelleninnenwiderstand bestimmt. Da moderne Ladegeräte den Zellenwiderstand während dem Laden ausweisen, kann dieser Wert zur Ermittlung der «echten Entladerate» herangezogen werden. Die „True C“-Rate wird wie folgt ermittelt:

$$\text{True C} = (\text{Kapazität [Ah]} * 6 [\text{W/Ah}] / \text{Zellwiderstand [Ohm]}) / 0,5 / \text{Kapazität [Ah]}$$

Ein Beispiel: Ein 4.300-mAh-Akku weist einen Zellenwiderstand von 2,4 mOhm auf. Seine „True C“-Rate beträgt somit:

$$(4,3 * 6 / 0,0024) / 0,5 / 4,2 = 24,1 \text{ C} (= 103,7 \text{ A})$$

Diese Berechnung geht von der empirischen Annahme aus, dass eine Akkuzelle bei einer Dauer-



LiPo TRUE C 6b

Cell Data:	
Capacity	4300 mAh
Resistance (Ri) (value from charger)	2.4 mOhm
TRUE C-Rating	24.1...29.5 C
Discharge	Contunuous w. airflow
TRUE C-Rate	24.1 29.5 C
Current	103.7 127.0 A

7b

IR Info		Cells IR Info	
1	2.3mΩ	1	2.9mΩ
2	3.3mΩ	2	4.3mΩ
3	4.7mΩ	3	6.3mΩ
4	2.9mΩ	4	2.3mΩ
S ₊	13.2mΩ	L ₊	13.7mΩ
S ₋	15.8mΩ	L ₋	27.2mΩ
DC 13.485V		0.0A 24.1Ah 59.8°C	

6a+6b | Ri am Ladegerät und „True-C“ **7a+7b** | Der Temperatureffekt auf Ri sowie die thermische Alterung

stromentnahme permanent einen Verlust (= Erwärmung) von sechs Watt pro Amperestunde abzubauen vermag. Damit bleibt die Akkumtemperatur ohne zusätzliche Kühlmaßnahmen in einem Bereich, der die Alterung nicht unnötig schnell vorantreibt. Durch pulsartiger Stromentnahme und/oder einem Zwangsluftstrom kann dieser Wert von sechs W/Ah maximal verdoppelt werden.

Wenn Sie nun diese Methode auf Ihre Akkus anwenden, werden Sie sagen „... aber meine Akku sind mit 35 C beschriftet“. Wegen fehlender Standardisierung bezüglich Definition der auf dem Akku angebrachten C-Raten, liegen die Angaben der Hersteller tendenziell höher als die „True C“-Rate. Es geht bei dieser Methode nicht um die Beurteilung der Beschriftungsqualität, sondern um relative Vergleiche. Eine höhere Stromentnahme ist wohl möglich. Sollte Ihr Akku nach dem Flug aber derart warm sein, dass er mit bloßer Hand nicht mehr fest umschlossen werden kann (~50 bis 60 °C), ist das ein untrügliches Indiz, dass er überlastet wird. Stetige Überlastung wird Ihren Akku wesentlich schneller altern lassen, der Innenwiderstand erhöht sich schnell und er wird zusehends heißer und altert noch schneller. Der Teufelskreis beginnt bis hin zur permanenten Schädigung – dem „Kugelfisch“ oder gar „Thermal Runaway“.

Wir Modellbauer streben meist nach ultimativer Leistung, hohem Gewicht-Schub-Verhältnis, hoher Steigleistung und mehr. Dabei tendieren wir, unsere Akkus wissentlich – oft aber auch unwissentlich – am oder über dem Limit zu betreiben – ein sehr schmaler Pfad zum Missbrauchen. Die Folge ist eine schnell voranschreitende Alterung und eine signifikante Verringerung der Lebensdauer. Die Lebensdauer definiert sich über die Anzahl Zyklen und die kalendarische Alte-

rung. 500 Zyklen sind ein Richtwert von Qualitäts-LiPos, der sich aber im Modellbau durch die „permanent“ hohe (Über-) Beanspruchung schnell auf 50 bis 200 Zyklen reduziert. Damit tritt die kalendarische Alterung in den Hintergrund. Erinnern wir uns an die Definition der Lebensdauer: Anzahl Lade-/Entladezyklen unter kontrollierten Bedingungen (z.B. 1C bei 20 °C) bis die effektive Kapazität noch 80 Prozent der Nennkapazität beträgt. Die Folge der Alterung ist stets mit einem Ansteigen des Innenwiderstandes (Ri) verbunden.

Was führt zur beschleunigten und irreversiblen Alterung und zum Widerstandsanstieg des Li-Akkus?

Lithium-Plating: Beim Laden werden die Lithionen nicht geordnet in die Graphit-Anode eingelagert. Stattdessen bilden sich Ansammlungen von metallischem Lithium an der Anode (-). Damit stehen weniger Ionen zur Verfügung, die Kapazität sinkt und der Widerstand steigt. Extremfall Zellenversagen: Das Lithium-Plating kann den Separator durchdringen und einen internen Kurzschluss mit der Kathode verursachen. Schnellladungen (>1C), Laden bei kalten Bedingungen (<10°C) oder Ladespannungen von über 4,2 Volt/Zelle (z.B. ohne Balancer) begünstigen das Lithium-Plating.

Temperatur Effekt: Die chemische Reaktionsgeschwindigkeit erhöht sich mit Zunahme der Temperatur (Arrhenius Effekt), der Ri sinkt und der Strom steigt. Die Verlustleistung am Akku steigt an ($P_v = I^2 R_i$). Ent-/Ladungen bei erhöhter Temperatur lassen aber den Ri mit zunehmender Zyklenzahl schneller ansteigen. Extremfall Zellenversagen: Ab 80 °C wird die Schutzschicht an der Kathode zwischen dem Kohlenstoff und dem Elektrolyten nachhaltig geschädigt. Das Elektrolyt kann nun unkontrolliert mit dem Gra-

phit reagieren. Hohe Ströme, externer Kurzschluss und Nutzung bei hoher Umgebungstemperatur unterstützen den Temperatur Effekt.

Kathoden und Anoden Degeneration: Die Struktur der Kathode bricht sukzessive zusammen, wodurch Sauerstoff freigesetzt wird und die Zelle bläht sich («Kugelfisch»). Der Kupferträger der Anode kann sich im Elektrolyt auflösen. Extremfall Zellenversagen: Bersten der Schutzhülle, beziehungsweise interner Kurzschluss. Beide Effekte sind die Folge einer extremen (auch wiederholten) Tiefentladung.

Die erwähnten Extremausprägungen führen zum Zellenversagen mit erhöhtem Risiko eines Thermal Runaways (unkontrollierte Erwärmung), der in folgenden Stufen abläuft: Ab 80 °C bricht die Schutzschicht an der Kathode [Solid Electrolyte Interface] zusammen und der Elektrolyt reagiert unkontrolliert und exotherm mit dem Graphit. Ab 110 °C beginnt die organische Lösung des Elektrolyten zu kochen und bildet dabei entzündliches Hydro-Karbonat. Der Druck in der Zelle steigt an. Da kein Sauerstoff verfügbar ist, brennt die Zelle zu diesem Zeitpunkt nicht. Im besten Fall reißt nun die Versiegelung und der Überdruck wird „kontrolliert“ abgeblasen. Im ungünstigsten Fall vermag die Versiegelung dem Druck standzuhalten. Ab 135 °C schmilzt der Separator und das ungehinderte Aufeinandertreffen der Elektroden führt zum internen Kurzschluss. Ab 200 °C reagiert die Metall-Oxid Kathode mit dem Elektrolyt und produziert Sauerstoff, während der Druck in der Zelle extrem ansteigt. Explosionsartiges Bersten der Versiegelung – oft mit Stichflamme – ist die Folge eines komplett ablaufenden Thermal Runaway.

Das Schreckensbild des LiPo-Feuers flammt immer wieder mal medial auf und es wird auf die Gefährlichkeit der Li-Akkus hingewiesen. Dies



8a+8b | In diesem LiPo-Akku hat ein Propeller eingeschlagen **09** | Sichere Aufbewahrungsbehältnisse sind Pflicht beim Lagern in Innenräumen

rührt wohl eher vom Bewusstsein, dass metallisches Lithium aggressiv mit Wasser reagiert. Li-Akkus enthalten aber keine freien Lithium-Atome und reagieren entgegen der langläufigen Meinung nicht mit Wasser. Ein mögliches Lithium-Plating ist sehr gering und nicht für allfällige Flammen verantwortlich. Obwohl verschiedene Branduntersuchungen auf einen Zellschluss hindeuten, sind sie nicht auf eine Spontanreaktion zurückzuführen. Die meisten Fälle können auf einen unbedachten oder gar fahrlässigen Umgang mit LiPos zurückgeführt werden: auf mechanische Beschädigung, Überladen (z.B. falsches Ladeprogramm, wie NiMH) oder einfach unbewussten Missbrauch des Akkus. Über-

raschenderweise entstehen viele LiPo-Brände durch unbeabsichtigte (externe) Kurzschlüsse oder durch gedankenlose Entsorgung der Akkus. Suspekte und angeschlagene Li-Akkus (hohe Temperatur > 80°C, verformt, hoher Zellendrift) sollten mit größter Vorsicht behandelt werden und im Zweifelsfall während mindestens 24 Stunden in einem feuerfesten Behältnis im Freien gelagert (und beobachtet) werden. Solche Akkus gehören weder ins Haus noch ins Auto!

Diese Ausführung soll sie nicht verunsichern, sondern nur den Extremfall aufzeigen. Der gewissenhafte Umgang mit Li-Akkus, die Einhaltung des Betriebsfensters (3 bis 4,2 Volt, 0-60 °C)

samt der vom Hersteller angeführten Sicherheitshinweise, machen die Lithium-Technologie im Modellbau-Alltag sicher und sorgen für langlebige Akku-Power.

Meine Empfehlungen für bessere Lebensdauer Ihres Akkus:

- Temperatur bei Entladung (max. 60°C).
- Korrektes Ladeprogramm!!
- Laden mit max. 1C und Balancer bei 10... 35°C.
- Lagern bei 3.6... 3.8V und erst vor Gebrauch laden.
- Nicht ausfliegen und min. 20% Restkapazität lassen (keine Tiefentladung!).

Markus Müller

new
DC-24

duplexx

SAFETY FIRST & INNOVATION STYLE

the choice of champions

www.hacker-motor.com

TM

pull

over

Maßanfertigungen

Sofortservice

protect your plane

pull-over, lindenstrasse 37, D-73230 kirchheim/teck, tel:+49(0)7021-482432, www.pull-over-products.com