

LADEZUSTANDSBESTIMMUNG AN NICKEL-CADMIUM-AKKUS FÜR DEN MODELLFLUG

F. Jach

Modellflugclub Rossendorf e. V.

Bautzner Landstr. 26, 01454 Radeberg /OT Rossendorf

Tel. 0351 – 2 64 08 56, e-mail: mfcr@fz-rossendorf.de

1 DER ANSTOSS ZU DIESER ARBEIT

Seit mehreren Jahren bin ich Mitglied im Modellflugclub Rossendorf e.V. Wir fliegen dort vorwiegend die Modelltypen Motorsegler mit Elektroantrieb und Segelflugmodelle. Für beides werden Nickel – Cadmium – Akkumulatoren verwendet. In Elektromotorseglern wird die Versorgungsspannung für den Fernsteuerempfänger üblicherweise aus dem – meist vielzelligen – Antriebsakku gewonnen. Wird diese so klein, dass der Motor nicht mehr läuft, ist noch immer genügend Reserve für die Empfängerkomponenten vorhanden. Anders beim Segelflugmodell: hier ist die Akkuspannung auf den Empfänger abgestimmt, und ein plötzlicher Spannungseinbruch infolge schlechten Ladezustandes kann zur Unterbrechung der Funkverbindung führen und letztendlich den Modellverlust bedeuten. Diese Unkenntnis über den Ladezustand hat in unserem Verein schon mehrere Modelle gekostet.



BILD 1: Ein Fernlenksegelflugmodell der Klasse F3J (Thermikfliegen) kurz vor dem Seilhochstart.

typische Modellparameter:

Spannweite $b = 3,70 \text{ m}$;

Masse $m = 2600 \text{ g}$;

Flächenbelastung $m/A_F = 35 \text{ g/dm}^2$;

Fernsteuerfunktionen: Höhe/ Seite/ Quer/ Wölbklappe

Strombedarf: $I = 1,4 \text{ A}$ (Betätigung aller Rudermaschinen gleichzeitig)

Da die einfache Messung der Betriebsspannung keine eindeutige Aussage über den Ladezustand liefert, entstand die Idee, nach Möglichkeiten für einen Schnelltest zur Bestimmung des Ladezustandes zu suchen. Durch diesen Schnelltest vor dem Start des Modells am Boden könnten Abstürze, besonders der in Bild 1 dargestellten großen und teuren F3J- Leistungssegelflugmodelle, infolge schlechten Ladezustandes der Batterien vermieden werden.



BILD 2: Im Modellflugclub Rossendorf e.V. verwendeter Empfängerakku für Segelflugmodelle. Die Kapazität beträgt 1,8 Ah; Typ KR-1900SCE; Sanyo, Bauform SC.

2 DIE ELEKTROCHEMISCHEN PROZESSE IM NiCd- AKKUMULATOR

2.1 Chemische Reaktionen im Akku

Grundlage aller Akkumulatoren ist die Redoxreaktion. Bei dieser Elektronenübergangsreaktion laufen die Teilreaktionen Oxidation (am Minuspol) und Reduktion (am Pluspol) gleichzeitig ab. Diese Reaktion ist umkehrbar. Die Hinreaktion (entladen) verläuft exothermisch, das heißt, Energie (hier in elektrischer Form) wird abgegeben. Die Rückreaktion (laden) verläuft endothermisch, also unter Energieverbrauch.

Im geladenen Zustand besteht die Anode des NiCd – Akkus aus Cadmium (Pluspol) und die Katode aus Nickel(III)-oxidhydroxid. Als Elektrolyt wird Kaliumhydroxidlösung (20%) verwendet.

Belastet man die Zelle, wird die Anode oxidiert – das heißt, sie gibt Elektronen (e^-) ab und wird damit zunehmend positiver geladen – und die Katode reduziert – das heißt sie nimmt Elektronen auf und wird deshalb zunehmend negativer. Cadmium am Minuspol wird in Cadmiumhydroxid umgewandelt. Die freien Ladungsträger (e^-) fließen durch den Stromkreis zum Pluspol, Bild 3.

Dort wird Nickel(III)-oxidhydroxid zu Nickelhydroxid reduziert. Bei dieser Reaktion gibt es Hydroxid – Ionen (OH^-) ab, welche dann durch den Elektrolyten zur Anode „fließen“ und dort mit dem Cadmium reagieren. Damit wird der Kreislauf geschlossen, [1].

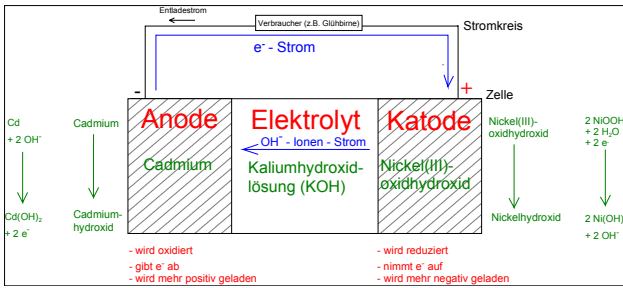
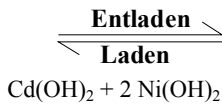
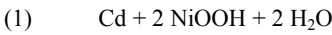


BILD 3: Chemische Reaktionen beim Entladen eines NiCd – Akkus

Beim Laden eines NiCd-Akkus laufen die umgekehrten Vorgänge ab: Cadmiumhydroxid am Minuspol wird wieder zu reinem Cadmium reduziert und Nickelhydroxid wird durch Oxidation in Nickel(III)-oxidhydroxid zurückumgewandelt.

Die Gesamtzellenreaktion lässt sich demzufolge wie folgt beschreiben, [2]:



Aus den Reaktionen an den einzelnen Polen ergibt sich die theoretische Spannung einer Zelle:

(2) $U_{\text{NiCd}} = U_{\text{Kathode}} - U_{\text{Anode}}$
 $= (0,49 \text{ V}) - (-0,81 \text{ V}) = 1,3 \text{ V}$

2.2 Der Innenwiderstand

Der Innenwiderstand kann anschaulich als Hemmnis des Stromflusses betrachtet werden. Grundsätzlich steigt sein Wert mit zunehmender Entladung an, weil die Endprodukte der Elektrodenreaktionen eine geringere Leitfähigkeit haben.

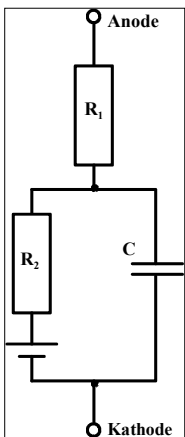


BILD 4: Elektrisches Ersatzschaltbild des NiCd-Akkus, [3]

Beim NiCd-Akkus bleibt der Innenwiderstand zunächst jedoch relativ konstant und klein, bis ca. 90 % der Zellkapazität entladen sind, und steigt erst bei weiterer Entladung stark an.

Der Gesamtinnenwiderstand umfasst verschiedene Teilwiderstände, die alle unterschiedliche chemische Ursachen haben. Die wichtigsten dieser Teilwiderstände sind der

Ohmsche Teilwiderstand, die Ladungsdurchtrittspolarisation, die Konzentrationspolarisation sowie der kapazitive Teilwiderstand, wobei letzterer eine untergeordnete Rolle spielt, [4].

Im elektrischen Ersatzschaltbild eines NiCd-Akkus sind die verschiedenen Teilwiderstände zu erkennen. Dabei umfasst R_1 größtenteils Kontaktwiderstände, und die Parallelschaltung von R_2 und C kann als Kombination der oben genannten Teilwiderstände betrachtet werden.

2.3 Der Memory-Effekt

Der Memory-Effekt tritt nach der Ladung eines Akkus nach unvollständiger Entladung auf.

Man kann diesen Effekt grundsätzlich mit der Änderung der physikalischen Eigenschaften der nicht gebrauchten aktiven Masse erklären: wird ein Teil der aktiven Masse nicht genutzt, kommt es zu einer Kristallvergrößerung von NiOOH und Cd an den Elektroden. Die damit verbundene Oberflächenvergrößerung führt zu einer geringeren Leitfähigkeit in diesen Bereichen. Damit erhöht sich der Innenwiderstand, was einen Spannungseinbruch zur Folge hat, [5].

Es gibt zwei verschiedene Arten des Memory-Effektes: den klassischen Memory-Effekt und den Lazy-Battery-Effekt.

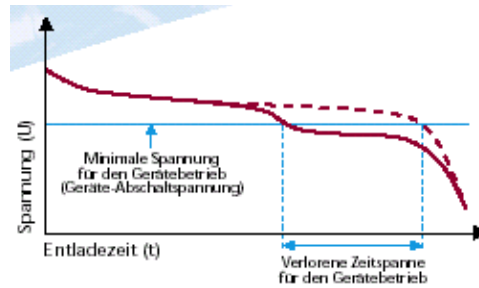


BILD 5: Kapazitätsverlust durch klassischen Memory-Effekt, [6]

Beim klassischen Memory-Effekt liegt die Ursache bei der negativen Cd-Elektrode, deshalb tritt dieser Effekt auch nur bei NiCd-Akkus auf. Die Auswirkungen sind in Bild 5 dargestellt: die Entladezeit wird extrem verkürzt. Dieser Kapazitätsverlust macht den Gerätebetrieb schnell unmöglich.

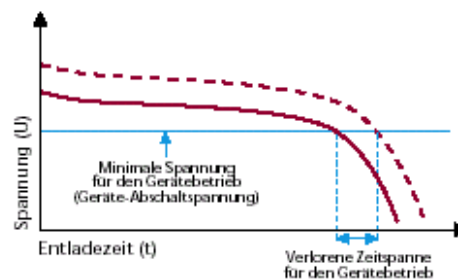


BILD 6: vorübergehende Kapazitäts- und Spannungsminderung durch Lazy-Battery-Effekt, [6]

Die Ursache des Lazy-Battery-Effektes liegt bei der positiven Ni-Elektrode, und kann deshalb sowohl bei NiCd-, als auch bei NiMH- Systemen auftreten, da die Ni-Elektrode bei beiden Systemen identisch ist. Die Auswirkungen sind mit einer vorübergehenden Kapazitäts- und Spannungsminderung weniger gravierend als beim klassischen Memory-Effekt.

Durch einige vollständige Entlade / Ladezyklen ist in beiden Fällen eine völlige Aufbereitung der Akkus möglich, [6].

3 BESTIMMUNG DES LADEZUSTANDES VON NiCd-AKKUS

3.1 Auswertung verschiedener Entladekurven

Bei den ersten Untersuchungen wurden die Akkus mehrere Male im Wechsel mit 1.4 A bis zur minimalen Batteriespannung $U_{bat_{min}}$ entladen und wieder aufgeladen. Als Ergebnis ist das Diagramm aus Bild 7 entstanden.

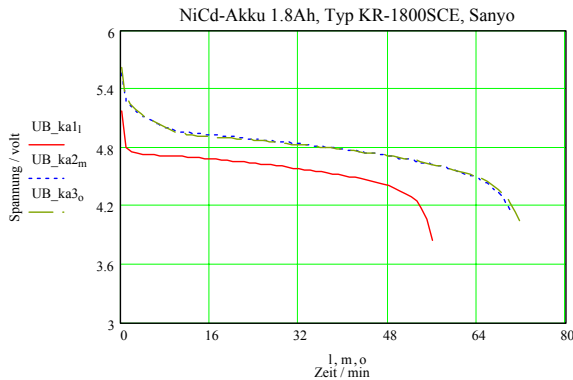


BILD 7: Entladekurven eines NiCd-Akkus bei Belastung mit 1.4 A

Dabei zeigt die untere (rote) Kurve den Zustand eines Akkus nach 6 Flügen, die jeweils rund 10 Minuten gedauert haben. Die obere (blaue) Kurve zeigt den Zustand desselben Akkus nach dem Wiederaufladen. Deutlich erkennbar ist die bessere Ausnutzung der Kapazität beim erneuten Entladen im Vergleich zur ersten Entladung (untere Kurve).

Der Akku hatte also nach der Ladung einen besseren Ladezustand als nach mehrmaliger Benutzung.

Aus diesen Entladekurven lassen sich schon die folgenden Kriterien für eine Aussage zum Ladezustand ablesen, welche man bereits am Anfang der Entladekurven auswerten kann:

- 1) Messung der Leerlaufspannung $U(t_0)$, denn aus den Kurven ist zu erkennen: je besser der Ladezustand ist, desto höher ist die Leerlaufspannung.
- 2) Bestimmung der Differenz $\Delta U = U(t_0) - U(t_1)$ von Leerlaufspannung und Spannung nach einer zeitlich nur kurzen Belastung, z. B. $\Delta t = 10s$, denn nach genauerer Auswertung der Spannungswerte entlang der Entladekurven wird deutlich: je besser der Ladezustand ist, desto geringer ist diese Differenz.

3.2 Untersuchungen zum Innenwiderstand

Mit Hilfe des Computerprogramms PSpice konnte nachgewiesen werden, dass ein Zusammenhang besteht zwischen dem elektrischen Ersatzschaltbild nach Bild 4 und dem in Bild 8 skizzierten zeitlichen Verlauf der Akkuspannung, der sich ergibt, wenn der Akku impulsförmig belastet wird. Diese impulsförmige Belastung erreicht man dadurch, dass an den Akku in kurzen Abständen ein Lastwiderstand an- und abschaltet wird und dadurch der Laststrom sprunghaft von Null auf einen bestimmten Wert und wieder zurück auf Null geht. Die „Antwort“ der Akkuspannung kann mit dem Oszillographen beobachtet werden.

Die Art des Verlaufs wird nachfolgend anhand der Ersatzschaltung erläutert.

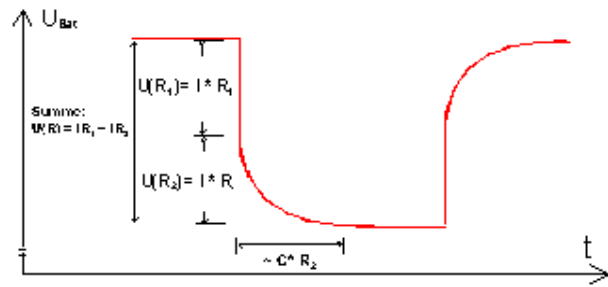


BILD 8: Oszillogramm bei impulsförmiger Belastung

Im unbelasteten Ruhezustand ist der Kondensator C auf die Leerlaufspannung des Akkus aufgeladen. Diese Spannung ist an den Klemmen zwischen Anode und Kathode (mit einem hochohmigen Instrument) messbar. Schaltet man einen Lastwiderstand an, so wird der durch ihn erzwungene Strom im Einschaltmoment vollständig aus dem Kondensator geliefert, und die ursprünglich messbare Leerlaufspannung wird sprunghaft um den Spannungsabfall $I \cdot R_1$ reduziert – es entsteht der erste, steil abfallende Teil.

Bleibt die Last lange genug angeschaltet, so kommt schließlich der gesamte Strom aus dem „idealen“ Teil des Akkus, und die messbare Spannung hat sich um einen weiteren Spannungsabfall $I \cdot R_2$ verringert – auf den stationären, unteren Wert in Bild 8. Dazwischen liegt jene Phase, in der sich der Kondensator von der Leerlaufspannung auf einen Spannungswert entlädt, der durch die Größe der Widerstände R_1 und R_2 vorgegeben ist. Diese Entladung geschieht mit der Zeitkonstante $T = C \cdot R_2$.

Der Vergleich der Oszillogramme aus Bild 9, die bei einem vollen und einem leeren Akku aufgenommen wurden, zeigt die Wirkung des Innenwiderstandes auf die Akkuspannung bei impulsförmiger Belastung genauer.

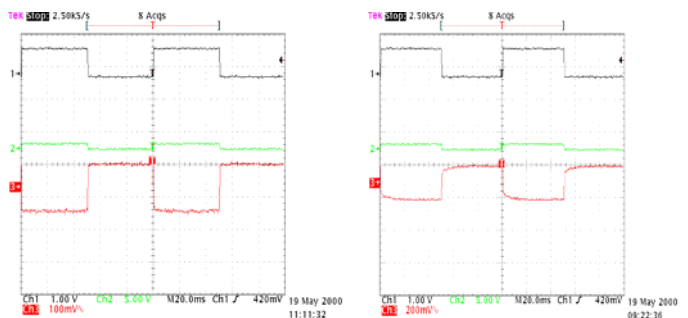


BILD 9: Vergleich der Oszillogramme von vollem (links) und leerem (rechts) Akku, jeweils unterstes Signal

Beim vollen Akku ändert sich die Akkuspannung (ch3, unterstes Signal) wie durch den Belastungsstrom vorgegeben: wird der Akku belastet, fällt die Spannung sofort ab, und steigt auf ihren ursprünglichen Wert, sobald der Akku nicht mehr belastet wird. Anders beim leeren Akku: wird der Akku belastet, sinkt die Spannung zeitverzögert ab, und sie steigt auch nur mit Verzögerung wieder an, wenn der Akku nicht mehr belastet wird.

Da diese Zeitverzögerung wie oben beschrieben dem Einfluss des Kondensators C unterliegt, ändern sich beim Entladen die Werte von R_2 und/oder C. Im Wesentlichen kann man davon ausgehen, dass sich R_1 und C während der Entladung nur wenig verändern, während R_2 mit zunehmender Entladung ansteigt. Weil nicht nur die Zeitverzögerung, sondern auch der Anteil $U(R_2)$ des Spannungsabfalls durch R_2 beeinflusst ist, werden sowohl die Zeitverzögerung, als auch der Spannungsabfallanteil $U(R_2)$ mit zunehmender Entladung größer.

Dies wird auch in Bild 9 deutlich:

da beim leeren Akku eine Zeitverzögerung zu erkennen ist,

muss $R_2 > 0$ sein. Aus dem in Bild 9 dargestellten Oszillogramm kann man einen ungefähren Wert für R_2 beim leeren Akku von 7 mΩ ablesen, wobei die Zeitverzögerung rund 10 ms beträgt. Beim vollen Akku dagegen muss R_2 sehr klein sein, denn eine Zeitverzögerung ist nicht ersichtlich. Für den in Bild 9 dargestellten Akku kann man von einem Wert für R_2 von 1 mΩ ausgehen. Deshalb ist auch der Wert von $U(R_2)$ sehr klein.

Durch das Messen und Auswerten von Zeitverzögerung und /oder Spannungsanteil $U(R_2)$ kann man auf den Teilinnenwiderstand R_2 schließen und erhält somit ein weiteres Kriterium zum Bestimmen des Ladezustandes.

3.3 Parametermessung von Akkus entlang ihrer Entladekurve

Um die gemessenen Werte der genannten Parameter (Leerlaufspannung $U(t_0)$, Spannungsdifferenz $\Delta U = U(t_0) - U(t_1)$ und Spannungsanteil $U(R_2)$) richtig einschätzen zu können, wurden alle Parameter entlang der Entladekurve gemessen.

Dabei wurden die Akkus erneut mit einer Belastung von rund 1.4 A bis zur minimalen Batteriespannung $U_{bat,min}$ entladen, diesmal aber in Abschnitten zu je 900 s. Der Messpunktabstand zur Akkuspannungsmessung betrug 10 s. Am Anfang von jedem Intervall, also aller 900 s, wurden folgende Parameter gemessen:

- Leerlaufspannung $U(t_0)$
- Spannungsdifferenz $\Delta U = U(t_0) - U(t_1)$
- Spannungsanteil des 1. (Teil-) Innenwiderstand $U(R_1)$
- Spannungsanteil des 2. (Teil-) Innenwiderstand $U(R_2)$
- Summe der Spannungsanteile der Teilwiderstände $U(R) = U(R_1) + U(R_2)$

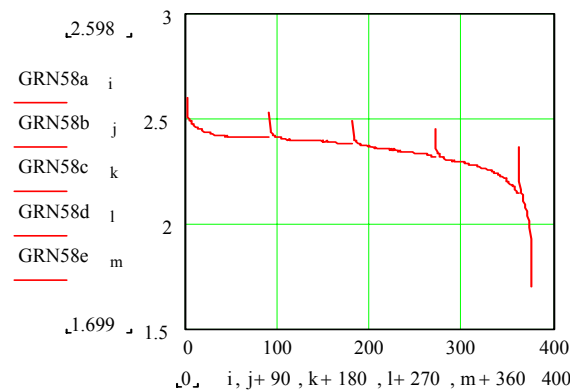


BILD 10: Entladekurve eines NiCd-Akkus bei Belastung mit 1.4 A, gemessen in Intervallen zu 900 s

In Bild 10 ist eine solche Entladekurve in einzelnen Abschnitten dargestellt. Es wird deutlich: Jeder Abschnitt für sich zeigt den typischen Verlauf einer NiCd-Akku-Entladekurve. Vergleicht man nur die Leerlaufspannungen $U(t_0)$ untereinander, so ergeben auch diese Spannungswerte eine typische Entladekurve.

Die ermittelten Messwerte der Parameter konnten nicht für jeden Akku ohne weiteres miteinander verglichen werden, denn jeder hat seine individuelle Gesamtentladungszeit. Deshalb wurde eine Normierung der Messergebnisse notwendig. Die Normierung passierte nun wie folgt: Die Gesamtentladungszeit eines Akkus wurde gleich $1 * C$ gesetzt, entspricht also 100% der Kapazität C des Akkus. Danach wurden die Parameterwerte für

$0.75 * C$ (= 75% von C), $0.5 * C$ (= 50% von C) und $0.25 * C$ (= 25% von C) aus den Messergebnissen bestimmt. Damit ist nun der direkte Vergleich der Messwerte bei verschiedenen Entladezeiten möglich.

3.4 Auswertung der Messergebnisse

Die normierten Messergebnisse für alle gemessenen Akkus wurden nun in je einem Diagramm für jeden gemessenen Parameter verglichen. Das Ergebnis der aussagekräftigsten Parameter ist in den Bildern 11 bis 13 dargestellt. Wie schon in Punkt 3.2 angesprochen, verändert sich von den Spannungsanteilen der verschiedenen Teilinnenwiderstände nur $U(R_2)$ charakteristisch, dass ist bei den Messungen entlang der Entladekurve noch einmal deutlich geworden. Deshalb wird hier auch nur das Ergebnis von $U(R_2)$ aufgezeigt.

Dabei sind auf der Abszisse die noch im Akku vorhandenen Anteile der Gesamtkapazität abgetragen: zu Beginn der Entladung sind noch $1 * C$, also 100% der Kapazität, am Ende $0 * C$, also 0% der Kapazität im Akku vorhanden. An der Ordinate erkennt man die jeweiligen gemessenen oder aus Messwerten errechneten Spannungswerte der Parameter, außerdem sind dort die 7 verschiedenen untersuchten Akkus aufgelistet und mit einer eigenen Farbe gekennzeichnet. Damit werden wieder die Messwerte eines Akkus entlang seiner Entladekurve sichtbar. Es wird auch deutlich, dass sich die Werte verschiedener Akkus teilweise sehr geringfügig unterscheiden. Damit wird es möglich, die Messwerte aller Akkus gleichermaßen durch Schwellen in Ladezustandsbereiche einzuordnen.

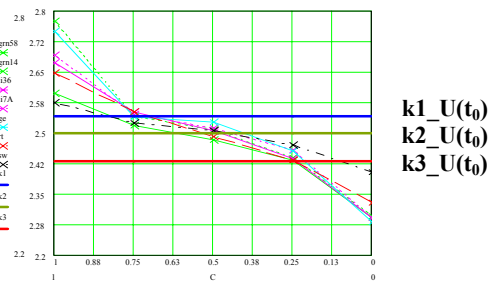


BILD 11: Leerlaufspannung $U(t_0)$ entlang der Entladekurve

Die Leerlaufspannung $U(t_0)$ als erstes Kriterium für eine Aussage zum Ladezustand ist in Bild 11 dargestellt. Wie schon in Bild 10 zu erkennen, sinkt $U(t_0)$ mit zunehmender Entladung stetig ab. Durch die eingetragenen Schwellen $k1_U(t_0)$ bis $k3_U(t_0)$ wird eine erste Aussage zum Ladezustand bezüglich $U(t_0)$ möglich. Beispielsweise weiß man nun, dass im Falle von $U(t_0) > k1_U(t_0)$, noch mindestens 75% der Gesamtkapazität C des Akkus vorhanden (=0.75*C) sind.

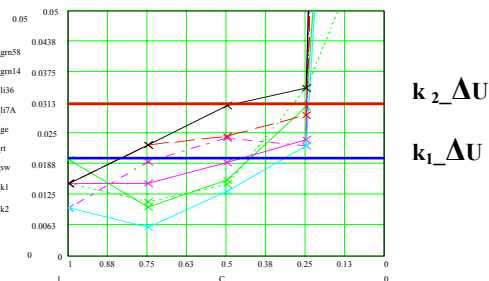


BILD 12: Spannungsdifferenz $\Delta U = U(t_0) - U(t_1)$ entlang Entladekurve

In Bild 12 ist die Spannungsdifferenz $\Delta U = U(t_0) - U(t_1)$ dargestellt. Sie steigt bis 0.25°C stetig an, und nimmt von da an rasant zu. Auch hier können Schwellen $k_1_{\Delta U}$ und $k_2_{\Delta U}$ festgelegt werden, die eine Unterscheidung der Messwerte nach Ladezustand ermöglichen.

So steht z.B. klar fest, dass der Ladezustand des geprüften Akkus maximal 0.25°C beträgt, wenn $\Delta U > k_2_{\Delta U}$. In diesem Fall ist der kritische Ladezustand erreicht und der betroffene Akku sollte nicht mehr genutzt werden.

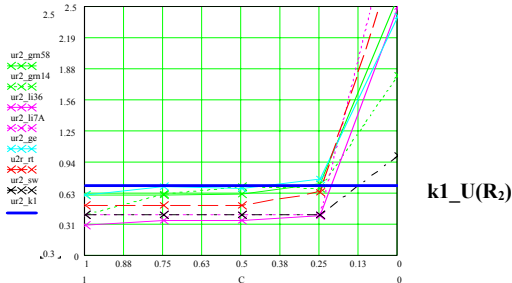


BILD 13: Spannungsanteil des 2. (Teil-) Innenwiderstandes $U(R_2)$ entlang Entladekurve

Das letzte Kriterium, womit man eine Aussage zum Ladezustand machen kann, ist der in Bild 13 dargestellte Spannungsanteil des 2. (Teil-) Innenwiderstandes $U(R_2)$. Wie schon in Punkt 2.3 angesprochen, bleibt der Wert von $U(R_2)$ lange fast konstant, und steigt erst ab 0.25°C stark an. Damit ist das Festlegen einer Schwelle $k1_{U(R_2)}$ möglich. Mit ihr kann man den Wert von $U(R_2)$ eines zu prüfenden Akkus eindeutig einordnen. Ist der Wert von $U(R_2) < k1_{U(R_2)}$, so liegt er noch im normalen Bereich. Ist der Wert von $U(R_2) > k1_{U(R_2)}$, dann hat dieser Akku einen kritischen Ladezustand und sollte nicht mehr genutzt werden.

3.5 Kombination der Kriterien

An den in Punkt 3.4 gezeigten Diagrammen wird deutlich, dass man zwar die meisten Akkus bezüglich eines Kriteriums grob einordnen kann, die Streuung der verschiedenen Akkus an einigen Stellen aber ziemlich groß ist. Das heißt, eine Ladezustandsbestimmung durch nur einen gemessenen Parameter ist nicht eindeutig.

Werden nun die Ergebnisse aller Parameter kombiniert, wird eine Einordnung in grobe Ladezustandsbereiche möglich.

Letztendlich läuft das Testverfahren wie folgt ab:

- Messen der Parameter Leerlaufspannung $U(t_0)$, und Spannungsdifferenz $\Delta U = U(t_0) - U(t_1)$ durch eine kurzzeitige statische Belastung, sowie Messung des Spannungsanteils $U(R_2)$, durch kurzzeitige impulsförmige Belastung
- Speicherung der Messwerte und Vergleich hinsichtlich der Schwellen
- Kombination des Schwellenverhaltens aller 3 Parameter
→ Ermittlung der noch im Akku vorhandenen / noch nutzbaren Kapazität als Ladezustandsbestimmung

Folgende Schwellenkombinationen sind möglich, womit die noch nutzbare Kapazität abgeschätzt werden kann:

Schwellenkombination

noch nutzbare Kapazität

If $k1 < U(t_0)$ AND $\Delta U < k2$ AND $U(R_2) < k1 \rightarrow 75\% \leq C$

If $k2 < U(t_0) < k1$ AND $\Delta U < k1$ AND $U(R_2) < k1 \rightarrow 50\% \leq C < 75\%$
Or $k2 < U(t_0) < k1$ $k1 < \Delta U < k2$ $U(R_2) < k1$

If $k3 < U(t_0) < k2$ AND $k2 < \Delta U$ AND $U(R_2) < k1 \rightarrow 25\% \leq C < 50\%$
Or $k3 < U(t_0) < k2$ AND $k1 < \Delta U < k2$ AND $k1 < U(R_2)$

If $U(t_0) < k3$ AND $k2 < \Delta U$ AND $k1 < U(R_2) \rightarrow 0\% \leq C < 25\%$

4 ZUSAMMENFASSUNG

Ziel der Arbeit war es, ein Verfahren zu finden, welches die Ladezustandsbestimmung von „mobilen“ NiCd-Akkus erlaubt. Die Ergebnisse der Untersuchungen zeigen, dass eine kurzzeitige statische und impulsförmige Belastung eines Akkus Informationen zu seinen elektrischen Parametern liefert. Die Kombination dieser Parameter erlaubt eine Abschätzung zum Ladezustand in groben Bereichen.

Eine gerätetechnische Realisierung ist mit modernen Bauelementen (rein analog oder mikroprozessorgestützt) möglich.

5 LITERATUR

- [1] K. A. Nishimura
Some Ramblings About NiCd Batteries
www.paranoia.com/~filip
- [2] M. Jäckel, K. T. Risch
Chemie Heute Sekundarstufe 2
Schroedel Schulbuchverlag GmbH; Hannover; 1988
- [3] G. Wiesspeiner
100% volle Akkus! Was bedeutet das?
Vortrag auf Entwicklerforum März 2001; München
- [4] K. Wiesener, J. Garcke, W. Schneider
Elektrochemische Stromquellen
Akademie-Verlag; Berlin; 1981
- [5] O. Weindl
Akku-FAQ
Fidonet, Elektronik.ger, J. Dambrowski
<http://fsinfo.cs.uni-sb.de/~benne/modbau/akku.htm#5>
- [6] E. Döhring, R. Korthauer, N. Knudsen, H. Siegmann,
Die Welt der Batterien - Funktion, Systeme, Entsorgung
Stiftung Gemeinsames Rücknahmesystem Batterien;
Hamburg; 2002
www.grs-batterien.de

6 DANKSAGUNG

Bedanken möchte ich bei den Mitarbeitern der Abteilung FWFE im Forschungszentrum Rossendorf, die mir beim Aufbau der Versuchsschaltung geholfen haben. Ganz besonderer Dank gilt Herrn Langenhagen, Vorsitzender des Modellflugclubs Rossendorf e.V. und Mitarbeiter der Abteilung FWFE, der den Anstoß zu dieser Arbeit gab. Außerdem möchte ich mich bei Dr. Pham, einem Chemiker im FZR, ganz herzlich bedanken, der mir bei der Erklärung der Messergebnisse aus chemischer Sicht sehr weitergeholfen hat. Den Firmen Panasonic und Sanyo gilt weiterer Dank für die Bereitstellung von Versuchsakkus, durch welche notwendige Messreihen mit einer größeren Anzahl von Akkus möglich wurden.