WETNOTES®
Das Fachmagazin für fortgeschrittene und technische Taucher

Nr. 9
3. Quartal 2012
D 7,50 € | A 7,50 € | CH 11,80 sfr

WETNOTES®

Das Fachmagazin für fortgeschrittene und technische Taucher

TAUCHCOMPUTER
Entwicklung, Evaluation, Konzepte

ORDA CAVE
Russlands kaltes Paradies

WRACKS *SAN MARCO, U-BOOTE* • **PHYSIOLOGIE** *TEC-WORKOUT*
TECHNIK *AKKUS II* • **SKILLS** *SIDEMOUNT 1X1* • **HÖHLE** *GOURNEYROU*

AKKU-

Text: Peter Gärtner

Nachdem im letzten Artikel (Wetnotes Ausgabe 7) vor allem die Spannungen und Kapazitäten von Akkus betrachtet wurden, soll dieses Mal der Spannungsabfall während des Entladens eines Akkus beleuchtet werden. Dabei werden nicht die letzten Details der Zusammenhänge berücksichtigt – vielmehr geht es darum, ein grundsätzliches Verständnis zu ermöglichen.

Was passiert beim Entladen?

Gegen Ende der Kapazität wird die Lampe dunkler, die Heizweste kälter oder der Scooter langsamer. Das liegt daran, dass die Spannung eines Akkus beim Entladen sinkt. Doch nicht alle Akkutypen zeigen das selbe Verhalten.

Entladekurven

In Abbildung 1 sind die Entladekurven verschiedener Akkutypen exemplarisch dargestellt. Blei-Gel (Panasonic), NiMH (Newtecs) und LiFePO (Headway) sind Messkurven aus eigenen Messungen, LiIon (Panasonic) und LiMn (Hersteller unbekannt) stammen aus Datenblättern. Die Entladekurven verändern sich mit der Höhe des Entladestroms – aber in den Grenzen, wie die Akkus beim Tauchen eingesetzt werden (niedrige Entladeströme), ergibt sich allenfalls eine leichte Verschiebung der Entladekurven, die Gesamttendenz bleibt gleich. Ebenso unberücksichtigt bleibt hier die Temperaturabhängigkeit der Entladekurven. Bei Lithium-Ionen-Akkus können sich die Entladekurven für verschiedene Modelle/Hersteller etwas unterscheiden, abhängig vom exakten Aufbau der Elektroden und des Separators. Das hier gezeigte Beispiel zeigt eine Zelle mit hoher Kapazität, dafür aber relativ starkem Spannungsabfall während des Entladens.

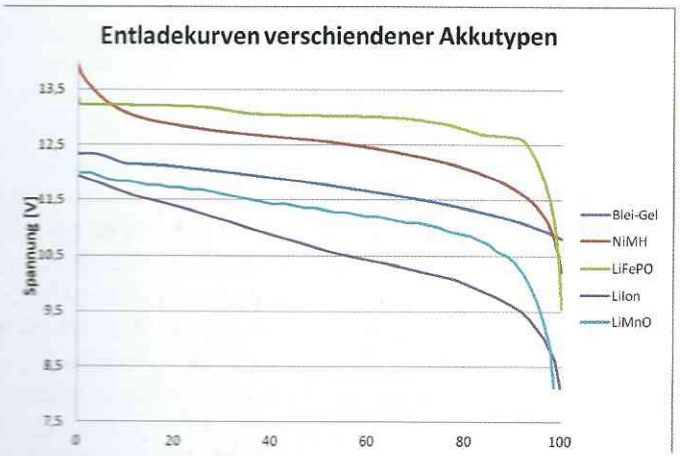

Abbildung 1: Spannungverlauf verschiedener Akkutypen während des Entladens (Entladekurven). Die Zeit ist in willkürlichen Einheiten aufgetragen (Prozent der Entladezeit), die Spannung in Volt.

In Tabelle 1 sind die Spannungsabfälle der verschiedenen Akkutypen in Volt zusammengefasst. Dabei wurde nur der wirklich nutzbare Spannungsbereich betrachtet – das Entlade-Ende wurde an den Knick gegen Ende der Entladung gesetzt, nicht an das Minimum der dargestellten Kurven.
Zunächst soll die Auswirkung des Spannungsabfalls auf elektrische Heizungen betrachtet werden.

Akkutyp	Spannungsabfall 12V [V]	Spannungsabfall 24V [V]
Pb	1,5	3
NiMH	2	4
LiFePO	0,6	1,2
LIMn	1,5	3
LiIon	2,4	4,8

Tabelle 1:
Spannungsabfall der Akkutypen während des Entladens
Auswirkungen der Entladekurve im Betrieb

1. Klassischer Heizdraht

Für den Temperaturbereich, der in Heizungen für das Tauchen vorkommt, kann der elektrische Widerstand eines Heizdrahtes/einer Heizmatte als konstant angenommen werden (Temperaturerhöhung von ca. 20° C ergibt einen Widerstandsanstieg von weniger als 10 %).

Die Heizleistung berechnet sich zu:

$$P = U * I$$

oder, über das Ohm'sche Gesetzt:

$$(U = R * I) \text{ zu } P = U^2 / R.$$

Die Heizleistung hängt also quadratisch mit der Spannung zusammen. Geht man vom Normalbetrieb von 12 V aus und nimmt einen mittleren Spannungsabfall von 1,85 V an (vgl. Tabelle 1) sowie einem Widerstand des Heizdrahtes von 2 Ω, kommt man zu:

$$P_Anfang = 12^2 / 2 \text{ Watt} = 72 \text{ Watt}$$

$$P_Ende = 10{,}15^2 / 2 \text{ Watt} = 51 \text{ Watt}$$

Die Leistung ist also um 21 Watt oder rund 30 % zurückgegangen. Damit ist die Heizung am Ende der Kapazität des Akkus merklich kälter, was auch der praktischen Erfahrung entspricht.

TECHNOLOGIE TEIL 2

2. Heizung mit Temperaturregler

Heizungen mit Temperaturregler (diese können entweder mit einem Temperatursensor und etwas Elektronik aufgebaut sein oder spezielle leitende Heizmaterialien aufweisen, die oberhalb einer bestimmten Temperatur sprunghaft ihren Widerstand anheben) können so ausgelegt werden, dass sie auch noch mit der geringeren Spannung am Ende des Tauchgangs genügend Leistung abgeben. Der Nachteil liegt auf der Hand: Für den sicheren Betrieb ist es notwendig, dass der Mechanismus zur Temperaturregulierung einwandfrei funktioniert. Ebenso ist der Aufwand für solch eine Lösung größer, was sich auch im Preis niederschlagen dürfte. Dafür gibt die Heizung von Anfang bis Ende die gleiche Wärme ab.

Auswirkungen der Entladekurve auf das Licht

Die Auswirkungen der Entladekurve auf das Licht kann man wieder in zwei getrennten Betrachtungen beschreiben.

1. Lampe ohne Regler (z. B. einfache Halogenbrenner, bestimmte Backuplampen mit LED ohne Elektronik).
Mit abnehmender Akkuspannung wird die Lampe dunkler leuchten. Da sich das Auge extrem schnell an veränderte Beleuchtungssituationen anpasst, ist der Leuchtkraftverlust selber nicht so schlimm – störender ist dann eher, wenn das Licht des Partners hell bleibt und man durch dieses Licht geblendet wird und seine eigene Lampe nicht mehr sieht. Das gleiche gilt natürlich für den Partner mit der helleren Lampe – für ihn ist es schwerer, den deutlich schwächeren Schein der Lampe des Partners wahr zu nehmen.
Das dunkler werden der Lampe bei nachlassender Akkuspannung kann auch einen Vorteil haben – man sieht, wenn man sich dem Ende der Leuchtdauer nähert und das Licht geht nicht plötzlich aus. Ebenso verlängert sich die Leuchtdauer beim direkten Betrieb deutlich, da mit nachlassender Spannung immer weniger Strom gezogen wird.

2. Lampe mit Regler/Spannungswandler

Die meisten HID- und LED-Lampen haben eine Elektronik verbaut, die dafür sorgt, dass der Strom, der durch das Leuchtmittel fließt, auch bei zurückgehender Spannung des Akkus konstant bleibt. Dadurch brennt die Lampe bis zum Kapazitätsende des Akkus unverändert hell – aber dann geht sie schlagartig aus. Die Vorwarnzeichen dafür sind, wenn keine Warnelektronik verbaut ist, nicht leicht zu erkennen (einige kurze Aussetzer oder eine Farbveränderung des Lichts) und treten erst unmittelbar vor dem finalen Ende auf.

Auswirkungen auf den Scooter-Betrieb

1. Scooter mit direkt angetriebenem Motor
Wird der Motor des Scooters direkt am Akku betrieben (dann meistens in 24-V-Ausführung), wird er sich bei niedrig werdender Spannung langsamer drehen, d. h. der Taucher wird langsamer. Hier kann wieder überschlagsmäßig gerechnet werden.
Geht man davon aus, dass der Motor einen reinen Ohm'schen Widerstand bildet (was so nicht stimmt) und einen Widerstand von 1,5 Ohm hat (realistischer Wert aus der Praxis) und entnimmt man den mittleren Spannungsabfall für 24 V aus Tabelle 1 (3,7 V), geht die Leistung, analog der Rechnung zum klassichen Heizdraht von:

$$P_Anfang = 24^2 / 1{,}5 \text{ Watt} = 384 \text{ Watt auf}$$
$$P_Ende = 20{,}3^2 / 1{,}5 \text{ Watt} = 275 \text{ Watt}$$

zurück. Doch was bedeutet das für die Geschwindigkeit? Die benötigte Leistung für eine bestimmte Fahrgeschwindigkeit hängt auch vom Schub ab:

$$P = F * v$$

(Fortsetzung auf der nächsten Seite)

Da Geschwindigkeit UND Schub bei fallender Akkuspannung nachlassen, muss man etwas rechnen. Der Schub bei einer gegebenen Geschwindigkeit entspricht genau dem Wasserwiderstand, den der Taucher bietet. Dieser ist, analog dem Luftwiderstand:

$$F = c_W * A * v2 * 1/2 * \rho$$

Setzt man das in obige Formel ein, kommt man auf:

$$P = v^3 * c_W * A * ½ * \rho$$

Widerstandsbeiwert cW, Fläche A und die Dichte sind konstant. Teilt man nun P_Anfang durch P_Ende kommt man auf:

$$P_Anfang / P_Ende = v_Anfang^3 / v_Ende^3$$

Eine realistische Anfangsgeschwindigkeit sind 40 m/min. Damit berechnet sich V_Ende wie folgt:

$$V_Ende = (P_Ende / P_Anfang)^{1/3} * v_Anfang = (275\ Watt / 384\ Watt)^{1/3} * v_Anfang = 36\ m/min$$

Am Ende der Akkukapazität fährt man also ca. 4 m/min langsamer – aus der Praxis heraus kann dieser Wert auch bis zu doppelt so groß sein, aber die Rechnung berücksichtigt einige komplexere Zusammenhänge nicht.
In der Tabelle 2 sind die unterschiedlichen, nach obiger Methode berechneten Geschwindigkeiten für die Unterschiedlichen Akkutypen zusammengefasst unter der Annahme, dass alle Scooter dieselbe Ausgangsleistung bei 24 V besitzen und die Motoren eine Widerstand von 1,5 Ω. Der Geschwindigkeitsabfall unterscheidet sich für verschiedene Akkutypen erheblich, insbesondere wenn man berücksichtigt, dass der Geschwindigkeitsabfall mit dieser vereinfachten Betrachtung unterschätzt wird.

Akku	v_Abfall [m/min]
Pb	3,3
NiMH	4,5
LiFePO	1,2
LIMn	3,4
LiIon	5,6

Tabelle 2: Geschwindigkeitsabfall für verschiedene Akkutypen.

2. Scooter mit Gleichstrom-Wechselstrom-Wandler

Einige Hersteller setzen in Scootern Wechselstrommotoren ein, bei denen dann durch eine Elektronik unabhängig von der Akkuspannung die Drehzahl konstant gehalten wird. Der Vorteil durch die konstante Geschwindigkeit ist klar: Beide Taucher sind gleich schnell, und die Berechnung der Tauchgangsdauer ist leicht möglich. Als Nachteil kann angesehen werden, dass jede Elektronik ausfallen kann und Geld kostet. Eine pauschale Aussage über die Wirkungsgrade der Systeme ist schwer, da hier viele Details berücksichtigt werden müssen. Die Verlustleistung ist schnell um den Faktor 2 falsch abgeschätzt.
Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Entladekurve bei Verbrauchern mit eingebautem Regler keinen Einfluss auf die Wärme/Helligkeit oder Geschwindigkeit hat, wohl aber auf Nutzungsdauer (Backuplampen!) und gegebenenfalls die Einschätzung auf die Restkapazität des Akkus (Scooter, Heizung). Je nach Einsatz sollte man sich überlegen, welche Ausführung die meisten Vorteile bringt. Ebenso muss man vor dem Einsatz von Akkus anhand der Entladekurven in Datenblättern überprüfen, ob die Entladekurve des gewählten Akkutyps den Anforderungen entspricht.
Als ideal in den obigen Fällen aufgrund der Entladekurve erscheint der LiFePO-Akkutyp, da er den geringsten Spannungsabfall während der Entladung hat. Dafür lässt sich sein Ladezustand mit einem kleinen Multimeter am Tauchplatz nur schwerlich bestimmen, und bei Flugreisen bekommt man Probleme (für mitgeführtes Lithium gibt es eine Obergrenze, welche man schnell erreicht. Ebenso ist es sicher spannend ,mit den Sicherheitsbeamten die Datenblätter zum Lithiumgehalt der Akkus zu diskutieren).
Die Auswahl des geeigenten Akkutyps ist komplex – doch mit diesem und dem vorherigen Artikel sollte etwas Licht in die Vor- und Nachteile der unterschiedlichen Akkutypen gekommen sein.

Physikalische Größe	Kürzel	Einheit
Leistung	P	Watt
Spannung	U	Volt
Strom	I	Ampere
Kraft / Schub	F	Newton
Fläche	A	m²
Elektrischer Widerstand	R	Ohm/Ω
Dichte	ρ (rho)	kg/m³
Luft/Wasser Widerstandsbeiwert	c_w	Einheitenlos
Geschwindigkeit	v	m/s
Elektrischer Widerstand	U = R * I	
Elektrische Leistung	P = U * I = U² / R	
Mechanische Leistung	P = F * v	
Luft/Wasserwiderstand	$F_w = c_w * ½ * A * v^2 * \rho$	

Der Autor

Peter Gärtner ist Physiker und arbeitet als Entwicklungsingenieur in der Automobilbranche. Als Höhlen- und technischer Taucher und Ingenieur kennt er die Anforderungen an zuverlässige Ausrüstung und baut, was es nicht fertig zu kaufen gibt, selbst.