

Andreas Weingand

Wir rüsten auf mit einer Lithiumbatterie

Alles zu Funktion, Konzeption, Auswahl oder
Selbstbau
1. Auflage

Aus der Reihe „rund ums Wohnmobil“

Vorwort



Ich möchte mich zuerst einmal bei Ihnen bedanken, dass Sie dieses Buch erworben haben.

In einem Wohnmobilforum haben vor ca. zehn Jahren ein „Gast“ und ein Hr. „Sonnentau“ ein Lithium Batteriesystem vorgestellt und damit den speicherhungrigen Wohnmoblfahrern diese Technologie näher gebracht.

Der Gedanke ist bestechend: 50% Gewichtsersparnis bei doppelter Nettokapazität und höherer Entnahmestrom ohne Spannungseinbrüche. Der geeignete Batteriespeicher, um Kaffeemaschine, Fön, Induktionsherd besser zu versorgen und vielleicht auch noch die Pedelec-Akkus zu laden. Andere Wohnmoblfahrer folgten den Eigenbauvorschlägen.

In der 1. Generation waren es selbstgebaute Systeme mit den gelben Winston Zellen in einer Holzkiste, Balancermodule auf den Polen und ein Solid state Relay für einen UVP/OVP Schutz.

Für die 2. Generation zog der Markt mit sogenannten „Drop in Ersatz für Bleiakku“ nach, manche von mir auch Plug n` Pray genannt, die man, zumindest laut Werbung, 1:1

gegen die alte Bleibatterie tauschen kann. Aber auch für diesen Austausch sollte man einige Dinge beachten. Dieses Buch soll Ihnen dabei eine Hilfestellung bieten.

Auf den folgenden Seiten möchte ich Ihnen die Lithiumbatterie mit ihren Vorzügen und auch Nachteilen erklären und Sie vielleicht auch zum Austausch ihrer Bleibatterie anregen.

Vielleicht möchte der eine oder andere aber nicht so tief in die Lithium Technologie einsteigen. Dann starten Sie einfach ab dem „Vergleich Lithium zu Blei“ und überspringen die Grundlagen auf der die Lithiumbatterie aufbaut.

Viel Spaß beim Lesen
Andreas Weingand

Inhaltsverzeichnis

Grundlagen der Lithiumtechnologie

Und nun zum Thema Ladung und Entladung:

Batterieladung und Ladekurve

Ladespannung aus verschiedenen Ladequellen

Batterie Ladezustand (SoC)

Energiebilanz, Berechnung und Simulation

Nun etwas zur Auswahl des Batteriesystems

Einbauplanung

Batt. Abmessungen, Polanordnung, Befestigung

Abhängigkeiten zu der vorhandenen Elektrik

Abhängigkeit von der Temperatur und Zellheizung

Vergleich Lithium zu Bleibatterie

Fertigsysteme (Drop in), Bilder & techn. Daten

Infos zu Apps für „Drop in“ Smart BMS Systeme

Lithium als Li/Pb Hybridsystem?

Lithiumbatterie als Starterbatterie?

Konzeption des Li-Batteriesystems, 12 oder 24V?

Messpunkte für eine eventuelle Fehlersuche

Das Batterie Management System,

BMS Ersatzschaltbild für Balancing, UVP, OVP, ÜT
und UT

Notwendige Schutzschaltungen bei Lithiumbatterien

Zell Balancing Verfahren
Praktische Realisierung dieser Schutzfunktionen
Selbstbau eines Batteriesystems
Werkzeug und Messgeräte
Bausätze für den Eigenbau
Zellen für den Eigenbau, Anordnung, Balancing
Schutzabschaltung per Relais und Hochstromschalter
Elektronisches Smart BMS inklusive BC
 Das DALY BMS
 Die Smart BMS JBD Jiabaida oder auch von
 Xiaoxiang
Umbau auf Lithium/AGM Hybridsystem
Die erste Ladung!
 Funktionstest
Gehäusebox und mechanische Umsetzung
Gehäuse und fertige Selbstbausysteme
 Der Einbau
Batteriecomputer und Ladebooster
Schlusswort und Ausblick
Wichtige Dinge, die man beachten bzw. wissen sollte:
Anhang 1, Elektrik: Abkürzungen, Glossar,
Erläuterungen

Grundlagen der Lithiumtechnologie

Ich möchte Ihnen zuerst mit ein paar Worten die Lithiumbatterie sowie ihre Technologie und Funktion erklären. Sollten Ihnen einige Begriffe oder Abkürzungen nicht geläufig sein, finden Sie am Endes des Buches einen Anhang „Glossar“ mit Erläuterungen.

Vereinfacht gesagt ist ein Akkumulator (landläufig Batterie), ein System, das Strom durch eine elektrochemische Umwandlung speichert und bei Entladung wieder abgibt. Batterien bestehen aus einer oder mehreren Zellen, die in Serie oder parallel (oder einer Kombination von beidem) verschaltet werden. Sie werden zuerst geladen, um dann angeschlossene Verbraucher mit Spannung und Strom zu versorgen. Diese vereinfachte Beschreibung trifft auf Blei- und Lithium-Batterien gleichermaßen zu.

Auch bei der Lithiumbatterie wird, wie bei der Bleibatterie, beim Laden bzw. Entladen durch einen Ionenaustausch die Ladung der beiden Elektroden verändert und damit eine Spannung zwischen den beiden Elektroden auf- bzw. abgebaut.

Jede Li-Batteriezelle enthält also zwei Elektroden, die umgeben sind von einem Elektrolyt. Der Elektrolyt ist das Medium in dem Li-Ionen von einer Elektrode zur anderen wandern. Die Minus-Elektrode besteht aus Kupfer mit einer Graphitbeschichtung, die Plus-Elektrode ist aus Aluminium und mit einer Lithium- / Metalloxid Mischung beschichtet. Beide Elektroden sind durch einen Separator getrennt, damit kein Kurzschluss entstehen kann.

Bei der **Ladung** fließen die Li-Ionen durch die angelegte Spannung von der Plus-Elektrode durch den Elektrolyten zur Minus-Elektrode ab und lagern sich dort im Graphit ein. Diese elektrogalvanische Reaktion erzeugt im geladenen Zustand

Spannung zwischen den Elektroden, da sich Elektronen an der negativen Elektrode sammeln.

Durch den Anschluss einer Last an die Batterieklemmen setzt dann eine **Entladung** ein. Dann fließen die an der negativen Elektrode angesammelten Elektronen durch den Verbraucher und dann zur positiven Elektrode ab. Sind keine Elektronen mehr vorhanden, ist die Batterie entladen.

Als Ladungsträger dienen also Lithiumionen, daher der Name **Lithium Ionen Batterie**. Dieser Begriff ist ein Oberbegriff für alle Lithiumbatterien, denn **Li-Ion-Zellen** gibt es in unterschiedlichen chemischen Zusammensetzungen:

- Li-Titanat (LTO), 2,4V, Energiedichte w bis 90 Wh/kg
- Li-Manganoxid (LMO), 3,8V, w bis 120 Wh/kg
- **Li-Eisen-Phosphat (LFP), bzw. Li-Eisen-Yttrium-Phosphat (LFYP), 3.3V, Energied. w bis 120 Wh/kg**
- Li-Kobaltoxid (LCO), als Lithium Polymer (LiPoly) bekannt, 3,6V, Energiedichte w bis 180 Wh/kg,
- Li-Nickel-Mangan-Kobaltoxid (LNMC), 3,7V, Energiedichte w bis 210 Wh/kg
- Li-Nickel-Cobalt-Alu-Oxid (LNCA) 3,7V, w bis 250 Wh/kg
- Li-Schwefel (LS), 2,2V, Energiedichte w bis 350 Wh/kg.

Die Mischung der Oxyde bestimmt die Eigenschaften der Batterie wie z.B. Energiedichte, Zellspannung, Kaltladetemperatur und Entladestrom. Der Elektrolyt basiert bei einer LiFePO_4 Zelle auf einem giftigen Lithium Salz, gelöst in einer organischen Lösung. Durch diese Kombinationen ist auch die Zellspannung unterschiedlich. Eine LFP/LFYP Zelle bringt z.B. ca. 3,3V Nennspannung. Sie eignet sich damit sehr gut als zyklische Versorgerbatterie im Wohnmobil. Im Folgenden sind immer LiFePO_4 /LFP Zellen gemeint, wenn von Li-Batterien die Rede ist.

Wie Sie folgender Tabelle der Batterietypen entnehmen können, sagt die Zellspannung aber nichts über die jeweilige Speicherkapazität aus. Der optimale Verwendungszweck setzt sich deshalb immer aus mehreren Eigenschaften zusammen.

Chemische Zusammensetzung	Spezifische Energie	Spezifische Leistung	Sicherheit*	Leistungsfähigkeit	Lebensdauer	Kosten
LiCoO ₂ (LCO)	Sehr hoch	Mittel	Mittel	Hoch	Mittel	Mittel
LiMn ₂ O ₄ (LMO)	Hoch	Hoch	Hoch	Mittel	Mittel	Mittel
LiNiMnCoO ₂ (NMC)	Sehr hoch	Hoch	Hoch	Hoch	Hoch	Mittel
LiFePO ₄ (LFP)	Mittel	Sehr hoch	Sehr hoch	Hoch	Sehr hoch	Mittel
LiNiCoAlO ₂ (NCA)	Sehr hoch	Hoch	Mittel	Hoch	Hoch	Hoch
Li ₄ Ti ₅ O ₁₂ (LTO)	Mittel	Hoch	Sehr hoch	Sehr hoch	Sehr hoch	Sehr hoch

Quelle: White Paper 231, Schneider Elektrik

Ein weiteres Unterscheidungsmerkmal ist, ob der Elektrolyt in flüssigem, pastenförmigem oder festem Zustand eingesetzt wird. Der Elektrolyt ist giftig, brennbar und kann sich ausdehnen. Batterien mit flüssigem Elektrolyt (z.B. Winston) haben deshalb oben ein Überdruckventil. Deren Plattenflächen sollten vom Elektrolyt ständig benetzt sein, Fahrzeugbewegungen unterstützen diese Benetzung. Allerdings sollte man auch davon ausgehen können, dass gute Zellen bis zum Folienrand gefüllt sind und nicht „gluckern“. Prismatische Zellen sind mit einer dickflüssigeren Elektrolytpaste versehen und können lageunabhängiger betrieben werden. Bei Li-Polymer-Akkus, kurz LiPoly genannt, ist der Elektrolyt in eine feste Polymer-Elektrolyt-Membran (PEM) eingebettet.

Wenn man die **Energiedichte w** von Batterien mit anderen Energieträgern vergleicht, sieht man die generellen Probleme einer Energiespeicherung in Batterien. Der Energiegehalt von Diesel und LPG ist pro Kilogramm Gewicht hundert Mal, der von Wasserstoff sogar knapp dreihundertdreißig Mal höher, als der einer LFP Lithiumbatterie.

- Bleibatterie Pb bis 50 Wh/kg
- Lithium-Eisen-Phosphat (LFP) bis 120 Wh/kg
- Diesel 12.000 Wh/kg
- LPG (Butan, Propan) 13.000 Wh/kg
- Wasserstoff 33.000 Wh/kg

Diese gravierenden Unterschiede zeigen auf, wo das Energiespeicherproblem für Herd, Heizung und Kühlung liegen. Wir können die Energien von Diesel oder Propan schnell und direkt durch Verbrennung freisetzen, aber wir können diese Energie nicht in der gleichen Zeitdauer und Dichte in einer Batterie speichern! Allerdings sind Lithium Batterien darin wesentlich effektiver als herkömmliche Bleibatterien.

Abgesehen von der chemischen Zusammensetzung und der daraus resultierenden Energiedichte gibt es noch die unterschiedlichen Gehäuseformen (Pouch-Flachgehäuse, Can-Flachgehäuse und zylindrische Gehäuse in verschiedenen Größen (14250/16650/18650/21700/26650/32700/38140, siehe auch Abbildung).



Die Li-Zellen von CATL und GAIA (Envites Energy) können aus Deutschland kommen, Zellen von BYD, Calb, EVE, Lishen, Hunan CTS, LG Chem, Samsung, Tipsun und Winston Thunder Sky, werden in Fernost und unzählige Fabriken in Shenzhen (DeLong) und Guangzhou produziert.

Die erreichte Fertigungsqualität (Klasse/Grade A, B oder C Ware) in Bezug auf Elektrolytdurchdringung, Innenwiderstand, Kapazität und nicht zuletzt die Ladefähigkeit bei Frosttemperaturen bestimmen dann den Preis.

Das war es auch schon mit den Grundlagen, kommen wir jetzt zu den, in der Praxis wichtigen, Auswirkungen. Deshalb habe ich alle folgenden Themen aus der Sicht „**Eignung für den Einsatz als Aufbauversorgung im Wohnmobil**“ betrachtet.

Die beste Alltagseignung bei hoher Energiedichte und großer Sicherheit ergibt sich mit **LFP/LiFePO₄-Batterien**. Eine LFP-Batterie besitzt einen hohen Lade-/ Entladestrom (C1 bis C3) bei einer wesentlich flacheren Spannungskurve als bei einer Bleibatterie. Ihr großer Vorteil ist dabei eine relativ konstante Spannung von 13V bei gleichzeitig hohen Strömen (Wechselrichterbetrieb) bis zur Tiefentladungsschwelle. Ein Nachteil ist aber leider ihre Temperaturempfindlichkeit. Bei der Ladung unter +10°C sollte die Ladung mit großen Strömen vermieden und im Frostbereich abgeregelt oder gestoppt werden. Allerdings kann diese Schwäche durch eine Beimischung von **Yttrium** und anderen Metallen im Kathodenmaterial teilweise gemindert werden. Man spricht dann von einer **LFYP bzw. LiFeYPO₄ Zelle**.

Eine Winston Blockzelle oder eine prismatische Becherzelle liefert bis zu 300 Ah, die kleineren Rundzellen liegen bei ca. 1 bis 12Ah. Beide Akkubauformen haben pro Zelle eine Betriebsspannung zwischen 2,8 bis 3,6 V. Für eine 12V

Batterie werden jeweils vier Block- oder Becherzellen in Reihe geschaltet (4S) und ergeben dann ca. 11 bis 14V.

Bei den kleineren Rundzellen werden Stränge aus z.B. je 18 parallel geschalteten Zellen gebildet, um die gewünschte Stromstärke zu erhalten Vier dieser Stränge in Serie ergeben dann 13,2V nominelle Blockspannung

Bei einem mit 18 parallelen Rundzellen bestückten Akku mit 100 Ah wären dies z.B. bei Liontron 72 Rundzellen (18P4S).

Aufgrund der vielen einzelnen Rundzellen müsste das Balancing und die UVP/OVP/ÜT Überwachung aber erheblich komplexer ausgelegt sein. Das Balancing bei den Consumer Li Akkupacks erfolgt aber nur strangweise. Die Löwensysteme mit JBD BMS und 50mA Balancer kämpfen mit dieser Problematik. Manche dieser vielen Rundzellen laufen auch nach einem Jahr Betrieb noch aus dem Ruder.

Auch bei der Ladespannung ist die LFP Batterie empfindlicher als eine Bleibatterie. Die Ladung sollte deshalb am besten mit einem Konstantspannungslader erfolgen und je nach Zellenhersteller zwischen 13,8 V und maximal 14,4 V liegen. Auf den verfügbaren Datenblättern wird für Winston Zellen ein Spannungsbereich von 2,8 bis 3,6 Volt pro Zelle, entsprechend einer 4 Zellen Anlage 11,2 V bis 14,4 V empfohlen.

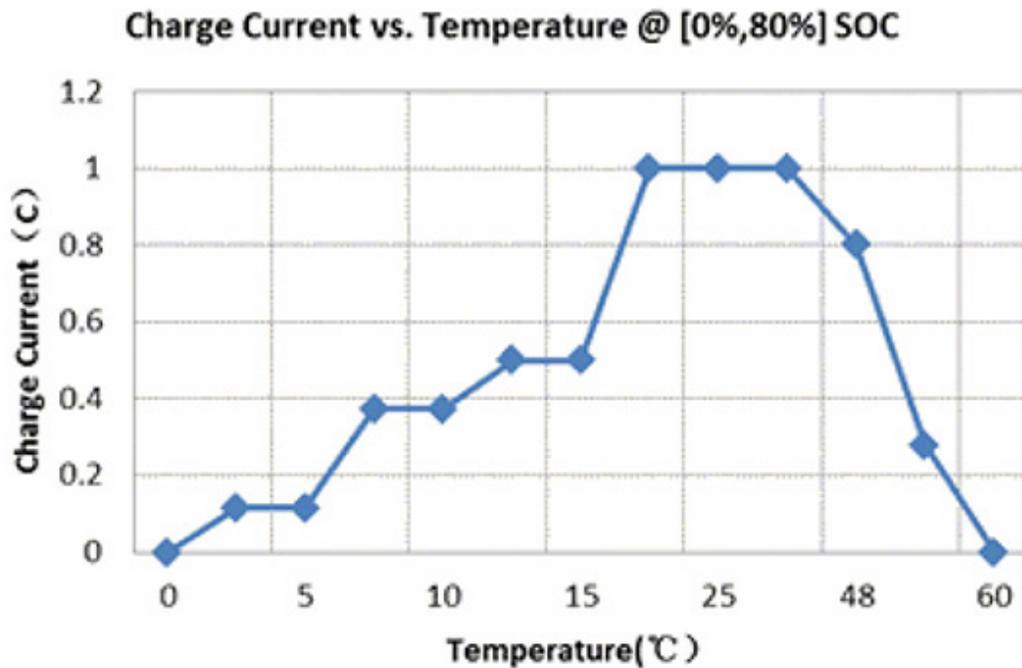
Spezielle Ladephasen wie bei Blei Batterien sind bei LFP Batterien nicht notwendig, aber auch nicht schädlich. Die Ladeschlussspannung liegt bei 14,4 V, die Tiefentladungsschwelle (DoD) liegt bei ca. 90 bis 95% der Gesamtkapazität bzw. 12V. Die Selbstentladung liegt bei ca. 1-2% pro Monat.

Da Lithiumbatterien im Vergleich zu Bleibatterien sehr empfindlich auf Überspannung und Ladung bei tiefen Temperaturen reagieren, benötigen sie für Ladung und Entladung ein automatisch reagierendes **Batterie-Management-System**, kurz **BMS** genannt.

Ein BMS besteht deshalb aus einem **Zell Balancing** pro Zelle und einem Überwachungssystem mit einer Abschalttechnik, das bei **Unterspannung (UVP)** und vor allem bei **Überspannung (OVP)** einer Zelle die Entladung/Ladung der Batterie abschaltet. Bei einer vorhandenen Temperaturkompensation in Ladebooster, Solarlader oder sogar Motorsteuerung muss deshalb die gelieferte Maximalspannung bei Minusgraden überprüft werden und darf nicht über 14,4 V liegen, da sonst ggf. die OVP Schutzschaltung anspricht.

Lithiumbatterien sind, im Gegensatz zu Bleibatterien, auch **frostempfindlicher**, man benötigt deshalb auch eine **Zell- und Ladetemperaturüberwachung**, die bei Zellübertemperaturen $>60^{\circ}\text{C}$ abschaltet und bei Temperaturen unter $+10^{\circ}\text{C}$ den Ladestrom begrenzt oder abschaltet.

Ein Grund ist, dass das im Elektrolyten enthaltene Ethylencarbonat bei Raumtemperatur eigentlich ein Feststoff mit einem Schmelzpunkt von 38°C ist. Bei niedrigen Temperaturen sulzt der Elektrolyt aus und dann völlig andere elektrische Eigenschaften hat. Der zweite Grund ist, dass bei Temperaturen unter $+10^{\circ}\text{C}$ und hohen Ladeströmen sich ein Teil der Lithiumionen nicht schnell genug in die Graphitschicht einlagert (Interkalation) sondern auf der Oberfläche verbleibt. Der Ionenaustausch benötigt Zeit und die ist bei hohen Strömen ggf. zu kurz. Durch die Ablagerung auf der Graphitoberfläche wird eine weitere Ioneneinlagerung (Ladung) erschwert. Diesen Vorgang, welcher nicht reversibel ist, nennt man "Lithium-Plating".



Quelle: [CATL Battery#](#)

Ein Ladestrom von 1C (1C entspricht einem einstündigen Ladestrom in Höhe der Zellenkapazität) wird für LFP Zellen nur bis max. 80% SoC bei einer Temperatur zwischen 18 und 37°C empfohlen. Sind 80% Ladezustand erreicht, sollte nur noch mit 0,8C weitergeladen werden.

Dies entspricht dann einer CC/CV Ladung. Ähnliches gilt unterhalb von 18°C, wobei bei nur 2°C weniger, also bei 16°C, sogar nur noch 50%, also 0,5C Ladestrom zulässig sind.

Bei 5°C liegt der zulässige Ladestrom nur noch bei 0,1C und ab 0°C darf überhaupt nicht mehr geladen werden.

Die Ladung bei Frosttemperaturen ist also zumindest bei LiFePO_4 (ohne Y) problematisch für die Lebensdauer.

Oberhalb 37°C sinkt der empfohlene Ladestrom erstaunlich schnell ab, oberhalb 60°C darf nicht mehr geladen werden.

Eine LiFePO_4 sollte man deshalb im Wohnraum oder im beheizbaren Doppelboden installieren, wenn man sie bei Minusgraden in Betrieb nehmen will.

In den ganzen Diskussionen um Ladeschlussspannungen, OVP, UVP, Übertemperatur oder untere Ladetemperatur sollte man aber eines nicht vergessen. Diese Schutzschaltungen dienen als Notabschaltung und sollten im normalen Betrieb nicht vorkommen!

Achtung: Bewerten Sie alle Angaben von Lieferanten wie "Temperaturbereich Ladung -20°C bis 65°C " als Übersetzungsfehler oder übertreibende Marketingangabe, solange Ihnen keine Datenblätter des Zellenherstellers vorliegen.

Allerdings gibt es inzwischen auch Li-Batterien (z.B. Liontron Arctic, Robur, Wattstunde), die bei Temperaturen unter $+10^{\circ}\text{C}$ beheizt werden. Der Strom dafür wird der Ladequelle entnommen, die Zellen auf über $+10^{\circ}\text{C}$ aufgewärmt und erst dann beginnt das Laden der Li-Zellen. Steht keine aktive bzw. potente Ladequelle (5A) zur Verfügung wird auch nicht geheizt!

Und nun zum Thema Ladung und Entladung:

Batterien haben, wie alles Elektronische, einen **Innenwiderstand**. Es ist allerdings kein ohmscher Widerstand sondern eine nicht lineare Addition von Impedanz- und vielen anderen Wirkwiderständen wie z.B. Art des Elektrolyt, Plattenkapazität, Temperatur, Ladezustand sowie Batteriealter und liegt bei einem guten 105 Ah Li-Akku bei ca. 1,4 mΩ. Zum Vergleich: Ein Gel Akku liegt bei ca. 3,8 mΩ und ein AGM bei ca. 4,5 mΩ.

Dazu kommen allerdings noch weitere ohmsche Übergangswiderstände wie Zellverbinder, Polklemmung und der Kabelschuhcrimpung. Sobald ein Strom fließt, entsteht an diesen Widerständen ein Spannungsabfall. Dieser zusätzliche Außenwiderstand, an dem bei steigendem Strom auch eine Spannung abfällt und die begrenzte Geschwindigkeit des elektrochemischen Prozesses, bestimmen die Lade- oder auch Entladezeit (C-Wert) einer Batterie.

Für die Ermittlung des Innenwiderstandes gibt es verschiedene Methoden. Bei Li-Ion-Zellen messen die Hersteller die Impedanz fast ausschließlich nach der AC-Messung bei 1 kHz. Diese Messwerte sind aber deutlich niedriger und kaum mit der durch die $\Delta U / \Delta I$ -Methode bestimmten Werte vergleichbar.

Bei der Ladung entsteht durch die Veränderung des Polmaterials und des Elektrolyten an den Elektroden eine Spannung, **Quellen- oder Leerlaufspannung**, früher auch **EMK** (elektromotorische Kraft) genannt. Diese Quellenspannung ist direkt abhängig von der Ladung SoC und ändert sich mit dieser. Mit jedem geladenem Coulomb (verständlicher: Ampere) steigt nun die Quellenspannung

(EMK) an, denn ein Akkumulator ist ja ein Sammler! (Siehe Batterieladung).

Beim Laden und Entladen gibt es natürlich durch die Energieumwandlung (Strom in Chemie und vice versa) Verluste und damit einen **Wirkungsgrad**, der bei Lithium Batterien so um ca. 95% liegt.

Allerdings sollte man bei Lithiumbatteriesystemen noch den internen Verbrauch des Zellbalancing, der BMS Regelung und der Bluetooth Funkverbindung (je nach Art und Aufbau ca. 10-100mA) in die Betrachtung einbeziehen. In der Winterpause summiert sich das und wer die interne Elektronik abschalten kann ist hier im Vorteil!

Bei Bleibatterien sind die wichtigsten Angaben der **C-Wert** und die **Anzahl der Zyklen**. Die Angabe C3 z.B. bedeutet, dass die Belastung mit dreifacher Stromstärke der Kapazität erfolgen kann. Bei Lithiumbatterien sind diese Werte aber aufgrund der fast gleichbleibenden Spannung bei der Stromentnahme und der großen Standfestigkeit relativ unwichtig. Der C-Wert liegt meist bei C2 bis C3. Bei einer Kapazität von 100 Ah heißt das, dass man ihr kurzfristig 300A entnehmen kann. Diese Aussage bezieht sich aber auf die reinen Zellen, das integrierte BMS kann anders eingestellt sein.

Entladetiefe und Tiefentladungsgrenze einer Li-Batterie

Eine weitere wichtige Angabe ist die **Entladungstiefe** oder **DoD** (Depth of Discharge). Die Entladungstiefe beschreibt das Verhältnis der entnommenen Energiemenge zur Kapazität und setzt dies ins Verhältnis zur Lebensdauer (Anzahl Zyklen), also z.B. 2500 Zyklen bei 90% Entladungstiefe DoD. Die Lebensdauer einer Batterie lässt sich damit gut über die Anzahl der **voraussichtlichen Zyklen** bei einer bestimmten Entladungstiefe bzw. der noch vorhandenen **Restkapazität** definieren.

Wie die Blei- hat auch die Lithiumbatterie eine **Tiefentladungsgrenze**, die bei der Entladung nicht unterschritten werden sollte, da sonst die Batterie geschädigt wird. Bei Lithium Batterien liegt sie bei ca. 10%. Eine Tiefentladung auf einen SoC von 0% ist möglich, verringert aber, entgegen mancher Marketingaussagen, definitiv die Lebensdauer.

Das BMS mit seinen Schutz- und Einstellungsmöglichkeiten ist allerdings auch die Schwachstelle des ganzen Systems. Denn im Zusammenhang mit Balancing, Zell/UVP/OVP/UT/ÜT Überwachung und SoC Ermittlung wird es konfigurationstechnisch erheblich aufwendiger, als bei einer einfachen Bleibatterie.

Welche Zyklenlebensdauer haben Lithium-Ionen-Batterien?

Ein **Zyklus** (per Definition) beinhaltet eine komplette Entladung sowie die vollständige Wiederaufladung eines Akkumulators.

Ein Zyklus nach IEC 896-2 entspricht einer 60%-iger Entladung bei 20°C und einem Entladestrom der einer 10 stündigen Entladung (also C10).

Die Zyklenlebensdauer gibt an, wie oft die Batterie in einem bestimmten Temperaturbereich vollständig entladen und wieder geladen werden kann, bevor sie ausgetauscht werden muss. Erreicht eine Batterie bei vollständiger Ladung nur noch 60 - 70% ihrer ursprünglichen Kapazität, hat sie ihre zyklische Lebensdauer erreicht. Eine herkömmliche Bleisäure-Batterie erreicht diese zwischen 200 und 600 Zyklen. Eine typische Lithium-Ionen-Batterie, kann mehr als 2500 Zyklen erreichen, bevor sie merklich an Kapazität verliert.

Diese Werte sind allerdings von verschiedenen Faktoren abhängig, unter anderem von der Entladungstiefe, der Entladungsart (zyklisch oder Stand by) dem

Entladungsstrom und der Temperatur bei der diese Vorgänge ablaufen. Einige Lithiumbatterien erreichen heute mehr als 5.000 Zyklen.

Bei manchen Smart BMS werden die Zyklen gezählt und angezeigt. Welcher Algorithmus dahinter steht und wer ihn wie definiert ist allerdings nirgendwo hinterlegt. Die angezeigte Zyklenzahl einiger Apps wird, meiner Meinung nach, extrem überbewertet. Kein Hersteller/Programmierer einer App kennt die Parameter der später eingesetzten Zellen, und bei welcher Nutzung der Zellherstellerangabe diese erreicht wird.

Zur praxisorientierten Einordnung dieser Werte:

Ist ein Wohnmobil zehn Wochen (70 Tage) im Jahr unterwegs und wird die 100 Ah Li Aufbauakku dabei jeden Tag um 90% bzw. 90Ah entladen und wieder voll geladen, sind das 70 Zyklen! Damit überleben Lithiumbatterien mit mehr als 2500 Zyklen, zumindest rechnerisch, das Wohnmobil!

Kurzzusammenfassung:

- **LiFe(Y)PO₄ Batterie**, Lithium/Eisen/(Yttrium)/Phosphat Versorgungsbatterie wartungsfrei, im zyklischen Betrieb ca. 2.500 Zyklen bei 90% Entladungstiefe (DoD), bedingt lageunabhängig, Zellen sind empfindlich gegen Über-Unterspannung / Tiefentladung / Ladung bei <10°C, Ladeschlussspannung ca.14,4 V, Quellenspannung bei 100% Ladung 13,2 V. empfohl. Ladestrom: C0,5 - C1, Ladetemperatur bei LiFeYPO₄: >0°C +45°C Ladetemperatur bei LiFePO₄: +10°C +45°C Tiefentladungsspannung: 12V, Entladestrom: C2, Entladetemperatur -20°C +55°C Selbstentladung bei 20°C ca. 1-2% pro Monat Bauformen: Winston Flachzellen, Rundzellen, prismatische Becher-Zellen.

Wer gute und fundierte DIY Videos ohne viel „Drum herum Gerede“ zum Thema Batterien und Solar sucht, wird bei Will Prowse auf YouTube fündig. Man kann dessen YT Beiträge wirklich anschauen, allerdings mit einem kleinen Nachteil: sie sind in Englisch.

<https://www.youtube.com/watch?v=XpO4s6Lrrmc>

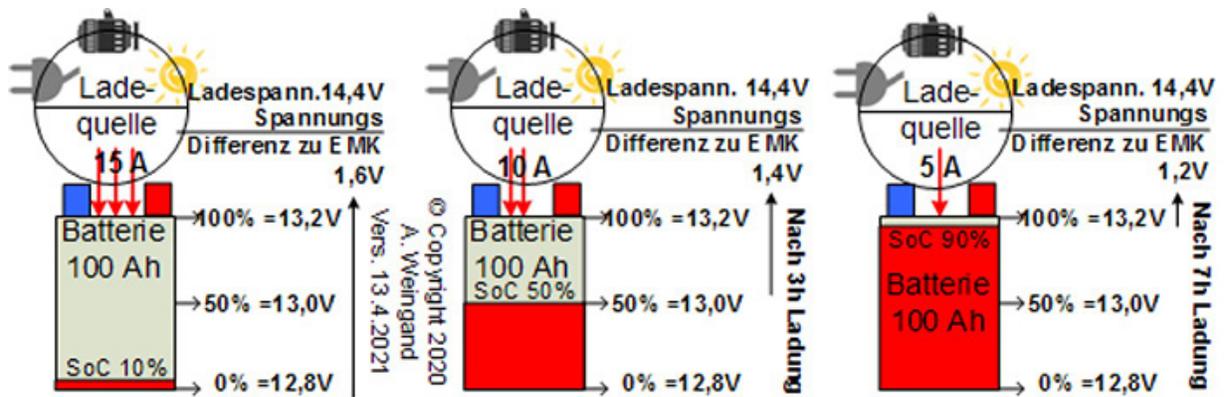
Batterieladung und Ladekurve

Zuerst einmal ein paar erläuternde Worte für die Leser, die nicht so tief in der Elektrotechnik verwurzelt sind. In der Elektrotechnik gibt es Spannungsquellen (Lichtmaschine, EBL, Solarregler) und Verbraucher (Licht, Kühlschrank oder auch die zu ladende Batterie), die aus diesen Quellen versorgt werden. Der Strom, der aus einer der Quelle in einen Verbraucher fließt, wird durch deren beiden Innenwiderstände bestimmt. Da sowohl für die Beleuchtung als auch zum Laden der Batterie ein Strom aus dem Ladegerät fließt sind beide, aus Sicht des 230V Laders, Verbraucher.

Aber die Batterie ist nicht nur ein Ladestromverbraucher sondern auch ein Ladestromsammler, und so kann auch diese Batterie später als Quelle dienen. Die Batterie sammelt die Ladung und deshalb steigt mit zunehmender Ladung (SoC) auch ihre **Quellenspannung bzw. EMK**. Diese Kraft der Quellenspannung setzt sich aber der Ladespannung entgegen. Mit zunehmender Ladung wird die batterieinterne Quellenspannung immer größer, der Ladestrom nimmt deshalb ab.

Dieses Spiel geht solange, bis die Batterie voll ist und Quellenspannung (Li 13,2V) und Ladespannung (14,4V) annähernd gleich sind.

Im Detail:



Bei steigender Ladung/Gegenspannung fließt weniger Strom, die Ladung wird langsamer.

Egal durch was die Ladung erfolgt, die Batterie bestimmt mit ihrem aktuellen Ladestand (SoC) den aufzunehmenden Strom. Die Ladung einer Batterie ist auch kein linearer Prozess, denn sie darf nicht als „ohmsche Last“ betrachtet werden..

In der Praxis heißt dies: „Je voller die Batterie ist, umso weniger Ladestrom fließt bzw. wird benötigt.“

Der höchstmögliche Ladestrom hängt dabei also nicht nur von der Leistungsfähigkeit der Ladequelle ab, sondern hauptsächlich von der Batterie bzw. deren Innenwiderstand und dem aktuellen Ladestand (SoC) bzw. der daraus resultierenden EMK.

Wichtig dabei ist, dass man dabei zwischen **Ladespannung** und **Ladeschlussspannung** unterscheidet. Die Ladespannung für Li-Batterien liegt so zwischen 12,2V und 14,4V und kann dauerhaft anliegen. Die Ladeschlussspannung bei einer Li-Batterie ist 14,6 V. Alles was darüber hinaus geht ist schädlich und sollte zu einer Schutzabschaltung führen.

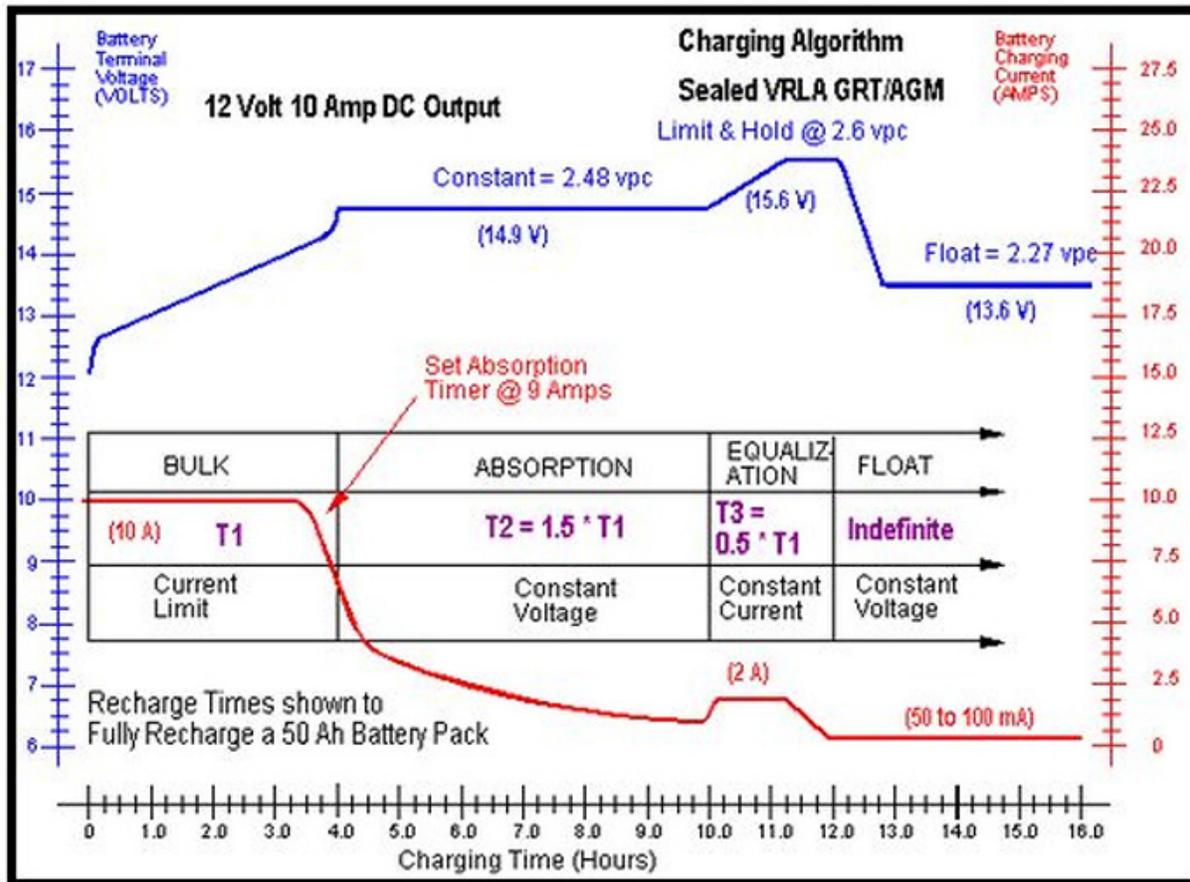
Um den unterschiedlichen Ladespannungen und der notwendigen Ladezeit gerecht zu werden, gibt es auch verschiedene Ladekennlinien. Diese teilen sich auf in eine Bulk/CC stromgeführte Ladephase und eine Absorption/CV spannungsgeführte Ladephase mit einer jeweils unterschiedlichen Zeitdauer.

- **WU** durch die Lichtmaschine: abfallender Strom bei steigender Batteriespannung.
- **I/Uo/U** Ladung durch Standardladegeräte für Lade & Bereitschaftsbetrieb mit schneller aber trotzdem schonender Ladung
- **CC/CV** Für die Ladung einer „zyklische Lithium-Versorgerbatterie“ eine I/U Ladung auch CC/CV Ladung (Constant Current/Constant

Bei Lithium ist die Zellausgleichsladung unnötig oder u.U. sogar schädlich. Auch eine lange Absorptionsphase wie bei Gel-Batterien sollte vermieden werden.

Die zwei folgenden Diagramme zeigen die unterschiedlichen Ladekurven am Beispiel einer I/Uo/Ue/U und einer CC/CV Ladung.

Vliesbatterie (Ca/Ca) (AGM, VRLA)



blau: Klemmenspannung in V, rot: Ladestrom in A, x-Achse: Ladezeit

1. Phase: Hauptladung, begrenzter Strom
2. Phase: Nachladung, konstante Spannung
3. Phase: Ausgleichladung, konstanter Strom
4. Phase: Erhaltungsladung, konstante Spannung

In diesem Diagramm ist vor der Float Phase noch eine Ausgleichladung (Equalization) eingefügt. Hier wird die Ladespannung für ca. zwei Stunden auf 15,6V angehoben. Diese Ausgleichladung erfolgt z.B. automatisch bei Ladegeräten der Fa. CTEC, Solarregler von Votronic & Büttner und dem 230V Lader CBE 516-3 oder Dometic MCA 1225.

Bei einer Li-Batterie ist die Ladung wesentlich einfacher. Entweder man nimmt ein **Konstantspannungsnetzteil** bzw.