
Akku-Technologien bei Drohnen und Flugmodellen

Bachelorarbeit

Autor: Erik Mrklas

Matrikelnummer: 1120101

E-Mail: erik.mrklas@unibw.de

Aufgabensteller: Prof. Dr.-Ing. Jörg Böttcher
Universität der Bundeswehr München
Fakultät für Elektrotechnik und
Technische Informatik (ETTI)
Professur für Regelungstechnik und
Elektrische Messtechnik

Abgabetermin: 30.06.2015

Eidesstattliche Erklärung

„Hiermit bestätige ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, noch nicht anderweitig für Prüfungszwecke vorgelegt und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe, insbesondere keine anderen als die angegebenen Informationen.“

.....
(Datum, Unterschrift)

Der Speicherung meiner Bachelorarbeit zum Zweck der Plagiatsprüfung stimme ich zu. Ich versichere, dass die elektronische Version mit der gedruckten Version inhaltlich übereinstimmt.

.....
(Datum, Unterschrift)

Inhaltsverzeichnis

Vorwort.....	6
1. Geschichte.....	7
2. Allgemeines.....	10
2.1 Begriffsunterscheidung.....	10
2.1.1 Abgrenzung zur Primärzelle.....	11
2.2 Geschlossenes und offenes System.....	12
2.3 Aufbau und Funktion.....	13
2.4 Bauformen.....	15
2.5 Selbstentladung.....	16
2.6 Batterie-Recycling.....	18
3. Kenngrößen und Begrifflichkeiten bei Akkus.....	19
3.1 Spannungen.....	19
3.1.1 Entladespannung	19
3.1.2 Ladeschlussspannung.....	19
3.1.3 Nennspannung	19
3.1.4 Ruhespannung.....	20
3.2 Der Innenwiderstand.....	21
3.3 Kapazität & C-Wert.....	22
3.4 Energiedichte.....	23
3.5 Zyklenzahl.....	24
4. Nickelakkumulatoren.....	25
4.1 Der Nickel-Cadmium-Akkumulator.....	25
4.2 Der Nickel-Metallhydrid-Akkumulator.....	26
4.2.1 Der LSD-NiMH-Akkumulator.....	28
4.3 Negative Effekte.....	30
4.3.1 Der Memory-Effekt.....	30
4.3.2 Lazy-Effekt.....	31

5. Lithiumakkumulatoren.....	32
5.1 Lithium-Ionen-Akkumulator.....	32
5.1.1 Funktionsprinzip.....	32
5.1.2 Lithium-Kobalt-Akkumulator.....	34
5.1.3 Lithium-Mangan-Akkumulator.....	34
5.1.4 Lithium-Eisenphosphat-Akkumulator.....	35
5.2 Lithium-Polymer-Akkumulator.....	36
5.2.1 Balancer und Equalizer.....	39
5.2.2 Tiefentladeschutz.....	40
6. Übersicht und Vergleiche.....	41
7. Akkusaltung.....	42
7.1 Serienschaltung.....	42
7.2 Parallelschaltung.....	44
7.3 Bezeichnung.....	45
8. Akkuladung.....	46
8.1 Grundlagen.....	46
8.1.1 Ladefaktor und Ladedauer.....	46
8.1.1.1 Beispiel.....	47
8.2 Ladearten.....	48
8.2.1 Konstantstromladung (CC).....	48
8.2.1.1 Konstantstromladung Spannungskontrolle.....	50
8.2.2 Konstantspannungsladen.....	51
8.2.3 Reflexladen.....	52
8.2.4 IU-Laden.....	53
9. Zusammenfassung.....	55
10. Literaturverzeichnis.....	57
11. Abbildungsverzeichnis.....	58
12. Tabellenverzeichnis.....	59

Vorwort

In einer Zeit, in der Mobilität und Flexibilität immer stärker werdende Faktoren darstellen, gewinnt eine spezielle Form der Energiespeicherung immer mehr an Bedeutung: Der Akkumulator. Er ist aus vielen Bereichen des Alltags nicht mehr wegzudenken. Ein Akkumulator (lat. *der Sammler*) ist ein Energiespeicher, welcher sich dadurch auszeichnet, dass er wiederholt geladen werden kann, um erneut Energie in Form von Strom abzugeben.

Akkumulatoren sind sowohl im Beruf, aber auch in der Freizeit ein ständiger Wegbegleiter. Akkumulatoren oder kurz „Akkus“ genannt, sind in den verschiedensten Größen, Bauarten und Technologien vorhanden. Doch egal, wo sie zum Einsatz kommen, haben alle eines gemeinsam: Sobald der Energiespeicher erschöpft ist, oder der Akkumulator aus anderen Gründen ausfällt, führt das von Unannehmlichkeiten bis hin zu schweren Schäden am betriebenen Gerät. Daher ist es wichtig, sich mit der Technologie, der Bedienung und dem sicheren Umgang mit Akkumulatoren auseinanderzusetzen. Ein fundiertes Wissen über Akkumulatoren und deren Funktion, erhält deren Leistungsfähigkeit und Haltbarkeit.

Im Rahmen meiner Bachelorarbeit möchte ich hier besonders auf die Technologie des Akkumulators mit Bezug auf leichte Drohnen, sowie Flugmodelle nehmen. Diese zeichnen sich durch ihren elektrischen Antrieb aus, welcher durch Akkumulatoren gespeist werden. Aber auch größere Drohnen und Flugmodelle, welche z. B. mit einem Verbrennungsmotor ausgestattet sind, verwenden oft zur Versorgung der Servos und der Bordelektronik Akkumulatoren.

Diese Arbeit soll einen kompakten Überblick über die aktuellen Möglichkeiten der Anwendung von Akkus geben und zum Verständnis der Technologie beitragen. Sie behandelt die verschiedenen Typen von Akkumulatoren und soll zeigen, wie durch den richtigen Umgang diese geschont und dennoch zur maximalen Wirkung gebracht werden können.

1. Geschichte

Als Begründer der Batterie- und Akkumulatoren-Technologie kann der italienische Physiker Alessandro Volta (1745 - 1827), welchem auch die Einheit der Spannung Volt [V] gewidmet ist, angeführt werden. Der italienische Arzt Luigi Galvani (1737 - 1798) legte im Jahr 1780 mit seinem berühmten Froschschenkel-Experiment, bei dem er die elektrische Wirkung von Elektroden erforschte, allerdings schon den Grundstein für die ersten Batterien.

Mit der Voltaschen Säule im Jahr 1800 gelang es Alessandro Volta die erste funktionierende Batterie hervorzubringen. Er schichtete abwechselnd Kupfer- und Zinkplatten aufeinander, welche er mit je einem Filzläppchen, das in Schwefelsäure getränkt war, trennte. Diese von ihm konstruierte Säule war nicht wiederaufladbar und lieferte eine Spannung von ca. 1 Volt. (RETZBACH, 2014)

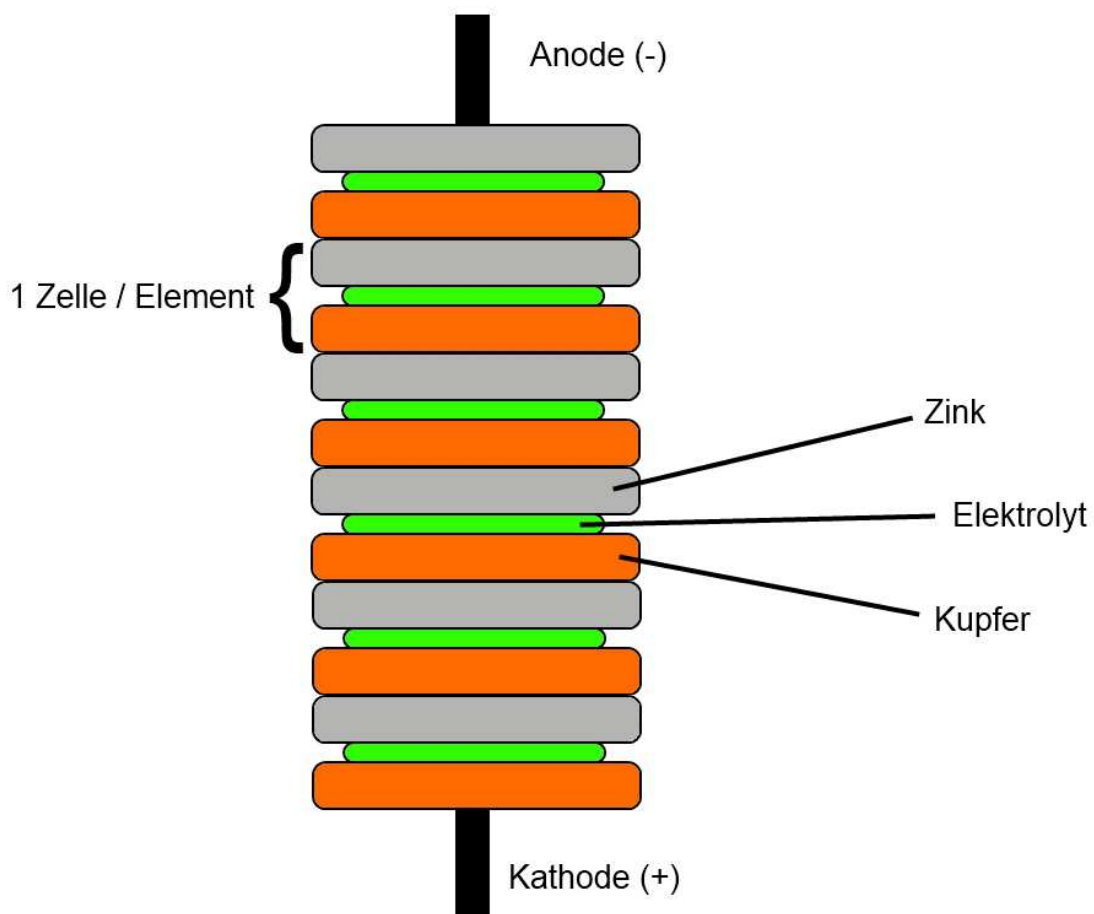


Abbildung 1: Schema der Voltaschen Säule

Dieses von Volta begründete Prinzip der galvanischen Kette wurde beibehalten und von mehreren Forschern und Erfindern übernommen und weiterentwickelt. Beispielsweise experimentierte der Schwede Waldemar Jungner (1869 - 1924) zum Ende des 19. Jahrhunderts mit verschiedensten Formen und Materialien zur Schaffung eines neuen, leistungsfähigen Akkumulators. Er schuf 1899 den Nickel-Cadmium-Akkumulator. Dieser hatte gegenüber des bis dahin vorherrschenden Bleiakkus unter anderem den Vorteil, dass der Elektrolyt beim Laden und Entladen unverändert blieb. (RETZBACH, 2014)

Obwohl unzählige Möglichkeiten der Zusammensetzung von Batterien und Akkumulatoren bestehen, sind nicht immer alle Konzepte sinnvoll. So ist beispielsweise der vom Amerikaner Yardney im Jahr 1905 entwickelte Silber-Zink-Akkumulator eine prinzipiell sehr gute Energiequelle, da er sich durch eine sehr hohe Energiedichte auszeichnet. In der praktischen Anwendung jedoch verliert er schnell an Bedeutung, da er schwierig zu handhaben ist, eine geringe Lebensdauer aufweist und nicht zuletzt durch seine verwendeten Materialien wie Silber sehr kostspielig ist. (RETZBACH, 2014)

Als es 1933 einem deutschen Entwicklerteam gelang, den ersten gasdichten NiCd-Akkumulator zu bauen, wurde die Grundlage für eine vielfältige Massennutzung von Akkumulatoren geschaffen. Mit dem Beginn der Serienfertigung durch die deutsche Firma VARTA Anfang der 50er Jahre breitete sich das Anwendungsgebiet der Akkutechnologie auf ein weites Spektrum aus. Durch die verschlossene Bauart war es möglich, Akkus in fast jeder Lage einzusetzen. Der ebenfalls dadurch reduzierte Wartungsaufwand machte den Einsatz dieser Akkutechnologie auch für Flugmodelle interessant, da zur selben Zeit auch große Fortschritte im Bereich der Funkfernsteuerung gemacht wurden. Durch die Entwicklung der Sinterzelle bei NiCd-Akkumulatoren durch die japanische Firma Sanyo gelang dem Akku-Markt ein weiterer Sprung nach vorn. Diese Hochstromzelle ermöglichte auch die Versorgung von sogenannten Powertools, wie beispielsweise dem Akkuschauber. Auch der Modellbau erfuhr durch diese Zellenform einen Schub, da es nun so gut wie für jedem möglich war, RC-Modelle (engl. radio-controlled) mit Elektroantrieb zu nutzen. (RETZBACH, 2014)

Auch wenn sich der NiCd-Akkumulator bis in die Mitte der 1990er zu einem der meistverwendetsten Energiespeicher entwickelte, wurde er zunehmend vom Nickel-Metallhydrid- und dem Lithium-Ionen-Akku abgelöst. Nicht zuletzt lag dies daran, dass durch das zunehmende Umweltbewusstsein die Verwendung des giftigen Cadmiums politisch nicht mehr tragbar war. Ab dem 1. Dezember 2009 ist das Inverkehrbringen von NiCd-Akkumulatoren, mit einigen Ausnahmen, deshalb verboten.

Durch die in den 1980er Jahren immer weiter entwickelte Lithium-Ionen-Technologie, begann diese auch kommerziell interessant zu werden. Diese Akkumulatoren sind deutlich leistungsstärker und weisen eine hohe spezifische Energie auf, sind jedoch sehr empfindlich gegenüber Tiefenent- und Überladung. Der erste Lithium-Ionen-Akku wurde 1991 von Sony hergestellt. (RETZBACH, 2014)

Eine Form des Lithium-Ionen-Akkus ist der Ende des 20. Jahrhunderts entwickelte Lithium-Polymer-Akku. Dieser zeichnet sich durch ein hervorragendes Leistungsgewicht und hohe Belastbarkeit aus. Durch die stetig steigende Massenproduktion dieses Typs, sind auch die Stückpreise deutlich gesunken. Durch seine vielen positiven Eigenschaften und seine hohe Energiedichte ist er aus der Modelltechnik nicht mehr wegzudenken. Seit Jahren gehört der LiPo-Akku zum Standard für elektrisch angetriebene Flugmodelle.

2. Allgemeines

2.1 Begriffsunterscheidung

Das Wort Batterie beschreibt eine Aneinanderreihung mehrerer gleichartiger galvanischer Zellen bzw. Elementen. Es wird oft auch als Oberbegriff für Primär- und Sekundärzellen verwendet. Im alltäglichen Gebrauch hat sich jedoch die Unterscheidung in Batterien (Nicht wiederaufladbare Primärzellen) und Akkumulatoren (wiederaufladbare Sekundärzellen) etabliert. Es kann allerdings auch durchaus zu Verwirrungen unter den Begrifflichkeiten kommen. So spricht man umgangssprachlich von einer „Autobatterie“, womit eigentlich ein Bleiakkumulator gemeint ist. Dies ist auf die Eigenschaft als Sammelbegriff für das Wort „Batterie“ zurückzuführen. Einen großen Einfluss darauf, hat auch der englische Sprachraum, in welchem beide Typen als „battery“ bezeichnet werden. Akkumulatoren werden im Englischen, zur expliziten Unterscheidung, gelegentlich als „rechargeable batteries“ abgegrenzt. (RETZBACH, 2014)

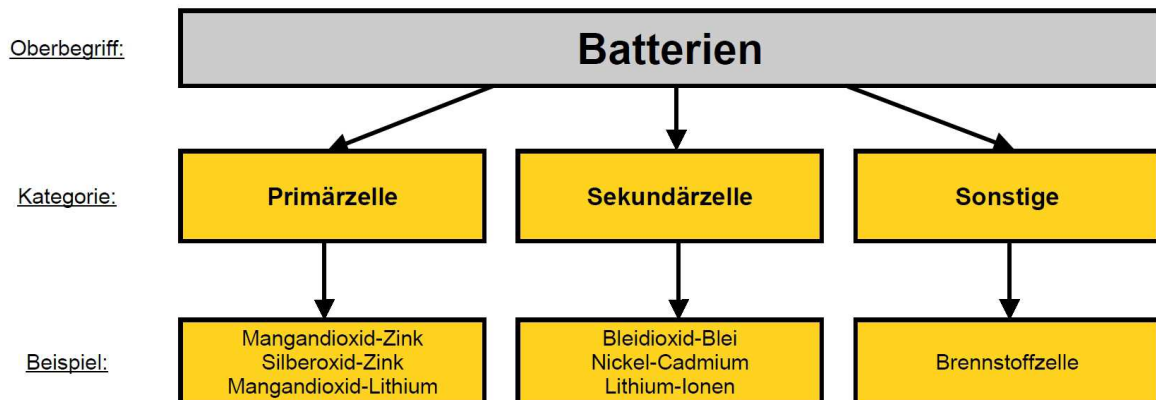


Abbildung 2: Gruppen der galvanische Zellen

Man unterscheidet grundlegend zwischen drei verschiedenen Arten der galvanischen Zelle:

Eine Primärzelle ist nach ihrem Zusammenbau aufgeladen und kann über einen längeren Zeitraum Energie abgeben. Die Entladung ist jedoch irreversibel, die Zelle kann also nicht erneut geladen werden. Man spricht hier im alltäglichen Gebrauch von einer Batterie.

Eine Sekundärzelle hingegen zeichnet sich durch die Eigenschaft aus, wiederaufladbar zu sein. Durch die Umkehr der Stromrichtung kann die elektrische Energie erneut (reversibler Prozess) in chemische Energie umgewandelt werden. Limitiert ist dieser Vorgang von der sog. Zyklenzahl (siehe 3.5), welcher die Anzahl der möglichen Aufladungen beschreibt, bis die Zelle unbrauchbar ist. Man spricht hier von Akkumulatoren oder kurz Akkus, da meist der Prozess der Wiederaufladung im Vordergrund der Anwendung steht.

Die Tertiärzelle, meist Brennstoffzelle genannt, ist keine Batterie im herkömmlichen Sinne, sondern ist als ein Wandler definiert. Sie speichert die Energie nicht in den Zellen wie es bei der Primär- und Sekundärzelle der Fall ist, sondern wandelt die Energie eines kontinuierlich zugeführten Brennstoffs in elektrische Energie um. Auf sie soll im weiteren nicht weiter eingegangen werden.

2.1.1 Abgrenzung zur Primärzelle

Primärzellen haben, trotz der fehlenden Möglichkeit der Wiederaufladung, den Vorteil, dass sie eine deutlich höhere Energiedichte als Sekundärzellen besitzen und die Selbstentladung deutlich geringer ausfällt. Auch durch niedrigere Anschaffungskosten zeichnet sich die Primärzelle aus.

Dennoch hat sie eben den entscheidenden Nachteil, nicht wiederaufladbar zu sein. Durch die Möglichkeit des Aufladens, ist auf lange Sicht die Sekundärzelle preislich rentabler.

Folglich werden Primärzellen dort eingesetzt, wo nur sporadisch und zeitlich unregelmäßig Strom zur Verfügung gestellt werden muss. Ein Beispiel hierfür wäre eine Notfalltaschenlampe. Sie muss im Notfall funktionieren und wird sonst kaum genutzt. Durch die relativ hohe Selbstentladung eignen sich Akkumulatoren hierfür nicht.

Hingegen ist bei häufig genutzten mobilen elektronischen Geräten der Einsatz von Akkus anzustreben, da sich die Möglichkeit der Wiederaufladung schon nach kürzester Zeit rechnet und die Selbstentladung meist keine große Rolle spielt, da die verwendeten Geräte mitunter sogar täglich geladen werden.

2.2 Geschlossenes und offenes System

Das Einsatzgebiet von Akkumulatoren erstreckt sich über ein sehr weites Feld. Sie kommen dann zum Einsatz, wenn keine Möglichkeit besteht, das betriebene Gerät vom festen Stromnetz aus zu speisen, oder dies unpraktisch wäre.

Man unterscheidet beim Anwendungsbereich zwischen dem Einsatz im geschlossenen und offenen System. Mit einem geschlossenen System ist in diesem Zusammenhang der folgende Aufbau gemeint: Der Verbraucher, die Ladeeinrichtung und der Akku sind fest miteinander verbaut. Ein Beispiel für so eine Konstellation wäre ein Notebook oder ein Mobiltelefon .



Abbildung 3: Verbraucher, Akku und Laderegulierung in einem Gerät

Das geschlossene System bietet den Vorteil, dass die Kapazität und die Belastbarkeit des Akkus genau auf den Verbraucher abgestimmt werden können. Die Laderegulierung übernimmt den Ladevorgang meist automatisch, sprich, sie stoppt das Laden also selbstständig, sobald der Akku die zulässige Ladespannung erreicht hat. Die Notwendigkeit eines Ladevorgangs wird dem Bediener meist durch optische oder akustische Signale mitgeteilt. All diese Eigenschaften des geschlossenen Systems machen es sehr benutzerfreundlich, da der Anwender in der Regel keine großen Eingriffsmöglichkeiten hat und somit auch keine Schäden am Akku durch unsachgemäße Behandlung hervorrufen kann.

Da diese Art von System dazu führen kann, dass der Anwender im Bezug auf Akku- und Ladetechnik nicht einmal Grundwissen besitzt, ist es wichtig, das Gerät gegen jegliche Form der falschen Benutzung zu sichern. Durch das nicht vollständige Aufladen des Akkus wird z.B. verhindert, dass er nie überladen wird. Das glei-

che gilt für die Tiefenentladung, welche dadurch verhindert wird, dass der Verbraucher vorzeitig abschaltet, obwohl der Akku noch Leistung bringen könnte. Auch die Ladezeit ist länger als eigentlich notwendig, um ein möglichst schonendes Aufladen des Akkus sicherzustellen.

Weitaus vielfältigere Möglichkeiten ergeben sich aus der Verwendung von offenen Systemen. Hierbei wird der Akku zum Laden entnommen und an ein, für den jeweiligen Akkumulatortypen geeignetes, Ladegerät angeschlossen. Dies bietet dem Anwender die Möglichkeit den Akku nach seinen speziellen Anforderungen anzupassen und ihn in der Anwendung zu optimieren. Ein fundiertes Fachwissen über das Funktionsprinzip und die Ladetechniken von Akkumulator ist hierbei zwingend erforderlich, da ein unbedachter Umgang mit Akkumulator diesen unbrauchbar oder sogar zerstören kann. Dies hat meist nicht nur Schäden am Akku, sondern (speziell bei LiPo-Akkumulatoren) auch an den eingesetzten Geräten zur Folge. Auch die Gefahr der Explosion einer Akkuzelle durch falsches Laden ist nicht zu vernachlässigen.

Offene Systeme kommen wie erwähnt dann zum Einsatz, wenn vorhandene Fachkenntnis es ermöglicht, das Optimum aus einem Akku herauszuholen. Besonders in der Modelltechnik ist dies meist wünschenswert.

2.3 Aufbau und Funktion

Im Prinzip haben sowohl die Primär- als auch die Sekundärzelle grundsätzlich den gleichen Aufbau einer galvanischen Zelle. Eine galvanische Zelle besteht aus je zwei Halbzellen, auch Halbelement genannt. Eine Halbzelle besteht aus einem Elektrolyt und einer darin getauchten Elektrode. Verbindet man nun die beiden Elektroden der Halbzellen mit einem elektrischen Leiter und die beiden Lösungen mit einer Ionenbrücke, so entsteht elektrischer Strom am Leiter.

Die Funktion dieser chemischen Stromerzeugung basiert auf dem Prinzip der Redoxreaktion. Wobei hier die Reduktion und Oxidation jeweils in einer der beiden Halbelemente getrennt voneinander ablaufen. Die maximal möglich abgegriffene Spannung hängt von dem eingesetzten Material der Elektroden, dem Elektrolyt

und seiner Konzentration, sowie der Temperatur ab, bei welcher der Vorgang stattfindet.

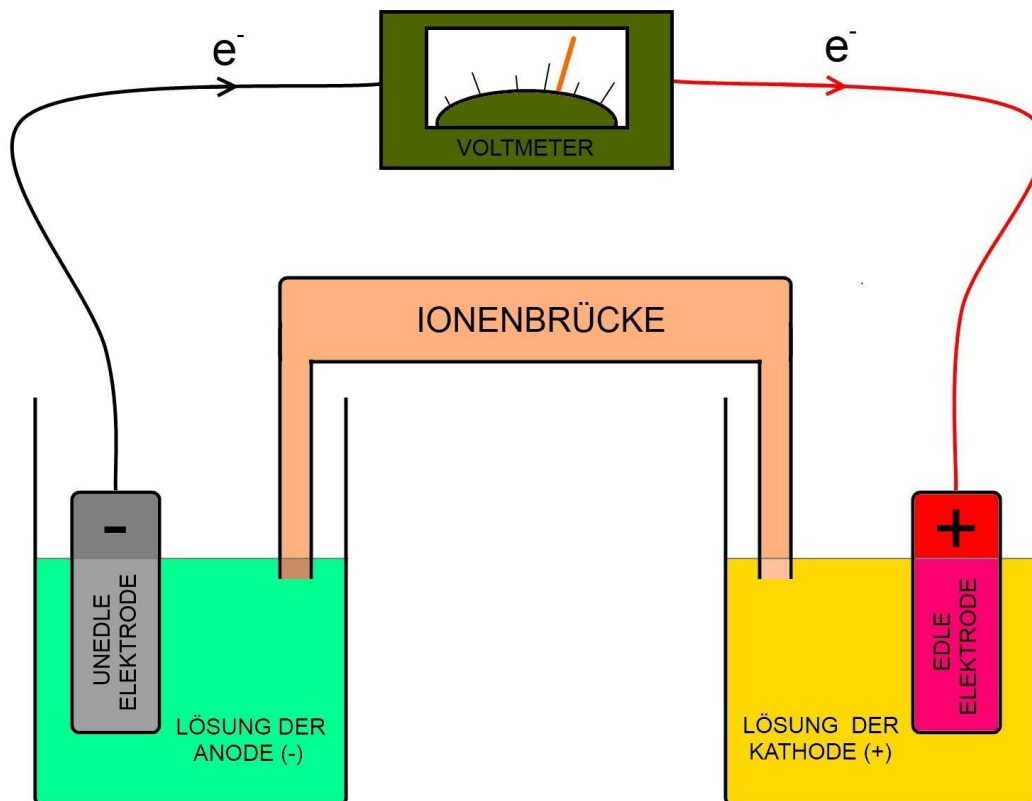


Abbildung 4: Schema einer Galvanischen Zelle

Die Redoxreaktion in der galvanischen Zelle ist, einfach gesagt, eine Elektronenverschiebung, bei der edle Metalle von den unedlen Metallen Elektronen aufnehmen. Die Elektronenabgabe nennt man folglich Oxidation, die Elektronenaufnahme Reduktion. Die Elektrode, welche Elektronen aufnimmt, nennt man die Kathode, sie ist der Pluspol einer Batterie. Die Elektrode, die hingegen Elektronen abgibt, nennt man Anode, welche den Minuspol darstellt. (KURZWEIL & SCHEIPERS, 2012)

Bei Primärzellen löst sich das unedle Metall im Elektrolyten auf, wobei es Elektronen abgibt. Das edle Metall nimmt diese Elektronen auf und bildet somit die Kathode. Bei Sekundärzellen hingegen kann durch die Umkehr des Stromflusses der chemische Prozess rückgängig gemacht werden. Beispielsweise besteht ein Bleiakkumulator aus Blei- bzw. Bleidioxid-Elektroden, welche sich in einem Schwefelsäurebad befinden. Wird der Akku nun entladen, überziehen sich beide Elektroden

mit Bleisulfat. Durch die Richtungsumkehr des Stromflusses, verwandelte es sich wieder in die Ausgangssubstanz. (KURZWEIL & SCHEIPERS, 2012)

2.4 Bauformen

Batterien und Akkumulatoren können in den unterschiedlichsten Bauformen auftreten. Man unterscheidet grundlegend unter den drei Gehäuseformen:

- Knopfzelle
- Zylindrische Zelle
- Prismatische Zelle

Knopfzellen und Zylindrische Zellen sind eher im Bereich der Batterien zu finden, da sie meist als einzelne Zellen hergestellt werden und je nach Bedarf hintereinander geschaltet werden können. Aber auch Akkumulatoren werden in zylindrischer Zellenform hergestellt. Der Nickel-Metallhydrid-Akku, kurz NiMH-Akku, ist ein Beispiel hierfür, jedoch werden die einzelnen Zellen meist parallel und/oder in Reihe geschaltet mit einer Kunststoffhaut verpackt, sodass sie im Endeffekt eine prismatische Form aufweisen.

Typ	Zellenbezeichnung	Durchmesser	Höhe
Micro	AAA	10	44
Lady	N	12	30
Mignon	AA	15	50
Baby	C	26	50
Mono	D	33	61
9-V-Block	PP3	26,5 x 17,5	49

Tabelle 1: Bezeichnungen von Batterie- und Akkubauformen – RETZBACH, 2014a, S. 35

Gängige Vertreter der prismatischen Bauform sind Akkus auf Lithium-Basis. Aber auch Blei-Akkumulatoren werden fast ausschließlich in einer rechteckigen Form hergestellt. Diese Art der Formgebung ermöglicht die optimale Raumausnutzung im später betriebenen Gerät. Hergestellt werden sie meist in schon finaler Reihen-

bzw. Parallelschaltung, sodass eine Änderung der Zellenkonstellation durch den Anwender nicht mehr möglich ist. (RETZBACH, 2014)

2.5 Selbstentladung

Einer der wohl interessantesten Kenndaten ist die Selbstentladung von Batterien und Akkumulatoren. Sie beschreibt das Absinken der nutzbaren Kapazität (siehe 3.3) über einen bestimmten Zeitraum.

Generell tritt der Effekt der Selbstentladung sowohl bei Batterien, als auch bei Akkumulatoren auf. Jedoch ist anzuführen, dass bei Akkus der Prozess um ein vielfaches stärker stattfindet. Die Intensität der Selbstentladung ist abhängig von vielen Faktoren. Hervorgerufen wird sie durch chemische Nebenreaktionen innerhalb der Zellen, oder durch interne Kurzschlüsse aufgrund schlecht verarbeiteter Separatoren.

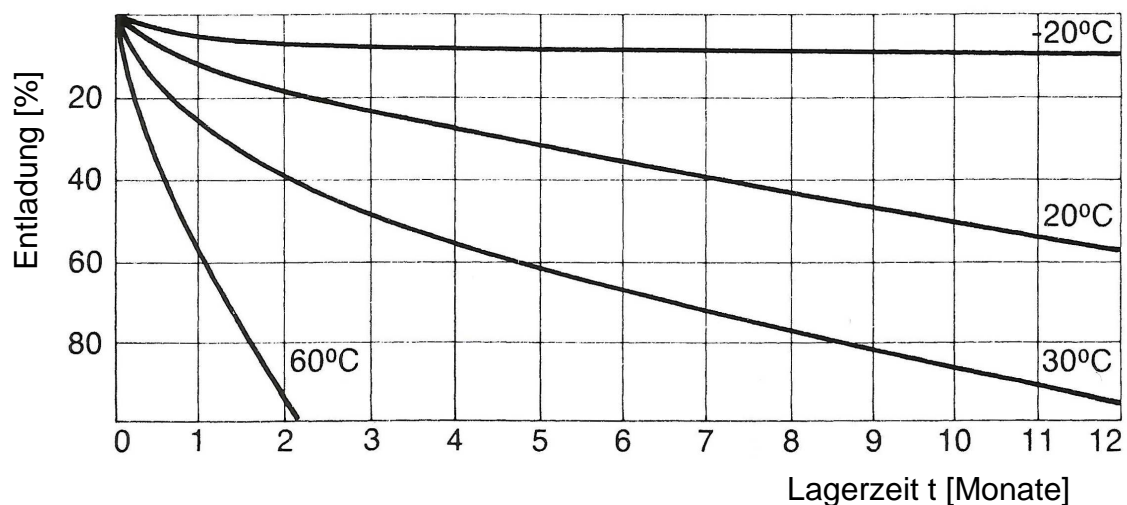


Abbildung 5: Selbstentladung eines NiCd-Akkus - RETZBACH, 2014a, S.52 (verändert)

Der größte Einflussfaktor für den Kapazitätsabbau ist die Temperatur. Je höher die Lagertemperatur in der sich ein Akku befindet, desto schneller entlädt er sich. Als Faustregel gilt: Eine Temperaturerhöhung um 10° bewirkt eine Verdoppelung der Entladegeschwindigkeit. Dies ist der Grund, warum für viele Akkumulatoren eine möglichst kühle Lagerung (z.B. im Kühlschrank) empfohlen wird.

Ebenfalls abhängig ist die Entladung vom Anfangsladezustand. Ein 100 % aufgeladener Akku entlädt sich schneller, als ein 80% geladener. Für viele Akkumulatoren bedeutet der Prozess der Selbstentladung, besonders vom 100 % geladenen Zustand aus, eine nicht zu vernachlässigende Belastung. Fast alle modernen Ladegeräte verfügen heutzutage über eine sogenannte „Storage“-Funktion. Das Ladegerät misst die aktuelle Spannung der einzelnen Zellen und bringt sie auf die programmierte Lagerspannung. Für Lithium-Polymer-Akkus beispielsweise beträgt diese 3,8 V. Diese Spannungen sind Versuchswerte und haben gezeigt, dass Akkus bei diesen Werten am längsten ihre Leistungsfähigkeit behalten.

Ebenfalls abhängig ist die Entladegeschwindigkeit natürlich von der verwendeten Technologie. So entladen sich Akkumulatoren auf Nickel-Basis deutlich schneller als z. B. Akkus auf Lithium- oder Blei-Basis. Eine Ausnahme bildet hier die Sonderform des LSD-NiMH-Akkus, welcher unter 4.2.1 näher erläutert wird.

Akkutechnologie	Selbstentladung pro Monat bei 20°
Lithium-Ionen	< 2%
Lithium-Polymer	< 5%
LSD-Nickel-Metallhydrid	< 1-3%
Blei	2%
Nickel-Cadmium	15-20%
Nickel-Metallhydrid	15-100%

Tabelle 2: Selbstentladung bei verschiedenen Akkutypen - LINDEN D. & REDDY T., 2002a

Relevant sind diese Werte im Bezug auf ihre Anwendungsbereiche. So werden für Starterbatterien in Kraftfahrzeugen fast ausschließlich Blei-Akkumulatoren verwendet. Ihre geringe Selbstentladung und Robustheit haben ihnen diesen Platz gesichert. Für Anwendungsbereiche in denen der Akkumulator täglich geladen wird, spielt die Selbstentladung eher eine untergeordnete Rolle.

2.6 Batterie-Recycling

Nicht nur aufgrund wachsendem Umweltbewusstseins, sondern auch steigende Rohstoffkosten führen dazu, dass der Wiederverwertung von Akkumulatoren und Batterien stetig mehr Bedeutung zukommt.

Primär- und Sekundärzellen bestehen oft aus toxischen Schwermetallen und reizenden Säuren. Dies ist einer der Hauptgründe, warum der Aufbereitung dieser Zellen ein hohes Maß an Aufmerksamkeit geschenkt werden muss. Viele Batteriehersteller haben sich zum einen dazu verpflichtet, vermehrt auf Technologien zu setzen, welche verträglicher für die Umwelt sind. Zum anderen, Batterien und Akkus, welche Ihre Nutzungsdauer überschritten haben, über den Handel wieder zurückzunehmen.

Ein großes Problem war die Bequemlichkeit, die entladenen Batterien direkt über den Hausmüll zu entsorgen. So gelangten Ende der 90er Jahre 400 Tonnen Cadmium jährlich indirekt über den Hausmüll in die Umwelt. Das entsprach mehr Cadmium, als in jedem anderen Industriezweig damals überhaupt jährlich verarbeitet wurde. (GRUBER, 1997)

Viele Maßnahmen, wie beispielsweise das Verbot der Verarbeitung von Quecksilber in den Zellen im Jahre 1999, oder der Verzicht auf ganze Technologiearten, wie dem Nickel-Cadmium-Akkumulator (siehe 4.1) haben zu einer deutlichen Verbesserung der Situation geführt.

Seit einigen Jahren hat auch die Europäische Union mit diversen Gesetzen dafür gesorgt, dass vermehrt Fokus auf die Rücknahme von alten Zellen gelegt wird. Aber auch der deutsche Gesetzgeber legt den Herstellern Pflichten auf. So ist beispielsweise seit 2012 eine Rücknahmequote von 35 % gefordert. Ab 2016 sollen 45 % aller entladenen und defekten Batterien sowie Akkus zurückgeführt werden. (Batteriegesetz, 2009)

2010 lag die Rücknahmequote bei 44 %, was einer Masse von 14.500 t an Altbatterien- und Akkus entspricht. (Stiftung Gemeinsames Rücknahmesystem Batterien, 2011)

3. Kenngrößen und Begrifflichkeiten bei Akkus

Bevor im weiteren Verlauf weiter auf die einzelnen Arten von Primär- und Sekundärbatterien eingegangen wird, ist es wichtig sich mit den wichtigsten Kenngrößen und Begrifflichkeiten einer Batterie bzw. eines Akkus auseinanderzusetzen. Denn nur, wenn jeder vom selben redet, ist ein sicherer Umgang mit galvanischen Zellen möglich.

3.1 Spannungen

Wie unter 2.3 bereits beschrieben, hängt die Spannung einer galvanischen Zelle von der Art der Elektroden, des Elektrolyts, sowie der Temperatur ab. Die aktuell nutzbare Spannung eines Akkus setzt sich weiterhin aus dem Ladezustand und der vergangen Zeit seit dem letzten Aufladen (da sich der Akku selbst entlädt) zusammen.

3.1.1 Entladespannung

Die Entladespannung ist die minimale Spannung, welche ein Akkumulator erreichen darf. Sie ist meist vom Hersteller angegeben und ist unter allen Umständen einzuhalten. Ein Nichtbeachten dieser Grenze kann zu irreparablen Schäden an den Akkuzellen führen.

3.1.2 Ladeschlussspannung

Die Ladespannung beschreibt den Spannungswert, über den ein Akku maximal verfügen darf. Er ist vom jeweiligen Akku-Typ abhängig und wird ebenfalls vom Hersteller angegeben. Ein Überschreiten dieser Spannung kann von der Schädigung der Zellen, bis hin zur Selbstentzündung des Akkus führen.

3.1.3 Nennspannung

Die Nennspannung ist ein spezifischer Wert, welcher die mittlere Entladespannung im normalen Betrieb angibt. Sie ist meist genormt und besitzt einen gewissen Toleranzbereich. Sie dient meist als Richtwert zur Dimensionierung eines Akkublocks oder einer Batterie. Die Nennspannung einer Batterie bzw. Akkumulators

setzt sich bei einer Reihenschaltung aus der Summe aller Nennspannungen der einzelnen Zellen zusammen.

Nennspannung	Zellentyp	Art
1,2 V	Nickel-Cadmium	sekundär
1,2 V	Nickel-Metallhydrid	sekundär
1,3 V	Quecksilberoxid-Zink	primär
1,4 V	Silberchlorid-Magnesium	primär
1,5 V	Alkali-Mangan	primär
1,5 V	Zink-Braunstein	primär
1,5 V	Zink-Luft	primär
1,5 V	Lithium-Eisensulfid	primär
1,6 V	Silberoxid-Zink	primär
2,0 V	Blei-Bleioxid	sekundär
3,0 V	Lithium-Mangandioxid	primär/sekundär
3,2 V	Lithium-Eisenphosphat	sekundär
3,7 V	Lithium-Ionen	sekundär
3,7 V	Lithium-Polymer	sekundär

Tabelle 3: Nennspannung von Batterien und Akkumulatoren

3.1.4 Ruhespannung

Von der Ruhespannung spricht man, wenn man die Spannung an den Klemmen des Akkus misst, solange er sich im Ruhezustand (kein Stromfluss) befindet. Nach dem Ladevorgang hat die Ruhespannung ihren maximalen Wert. Dieser fällt jedoch, der Selbstentladung geschuldet, mit fortschreitender Zeit ab. Bei Akkus auf Lithium- und Blei-Basis besteht ein proportionaler Zusammenhang zwischen gemessener Ruhespannung und dem aktuellen Ladezustand (State of Charge, SOC) der Zellen. Folglich kann relativ einfach anhand der aktuellen Ruhespannung, sowie der Lade- und Entladespannung der Ladezustand des Akkus ermittelt werden. Bei Nickel-basierten Akkumulatoren ist dies nicht ohne weiteres möglich.

3.2 Der Innenwiderstand

Eine wichtige Kenngröße für die Belastbarkeit eines Akkus ist der Innenwiderstand R_i . Er hat großen Einfluss auf die höchstmöglich abzugebende Leistung. Sobald der Widerstand des Verbrauchers den gleichen Betrag wie der Innenwiderstand hat, findet die maximale Leistungsabgabe statt. Würde man den Widerstand des Verbrauchers weiter senken, stiege zwar der Strom weiter an, die Leistung würde jedoch wieder absinken.

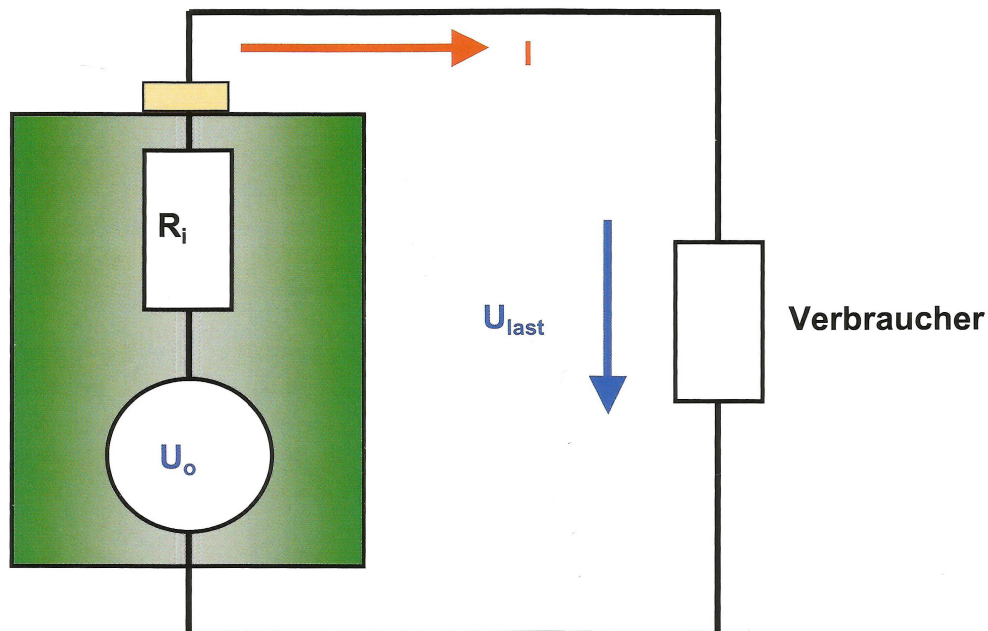


Abbildung 6: Innenwiderstand eines Akkumulators - RETZBACH, 2014a, S.25

Die Verlustleistung, welche durch den Innenwiderstand hervorgerufen wird, wird in Wärmeenergie umgewandelt. Dies ist auch der Grund, warum sich ein Akku beim Laden und Entladen erwärmt. Je höher der fließende Strom, um so mehr Energie wird in Wärme umgewandelt. Die Verlustleistung berechnet sich mit der Formel:

$$P = I^2 * R_i$$

Gl. 3.1

mit: I = Strom [A] & R = Innenwiderstand [Ω]

Der Innenwiderstand reduziert die „reine“ Spannung des Akkumulators, was zu einer verminderten gemessenen Spannung an den Klemmen führt. Sie berechnet sich wie folgt:

$$U_{ist} = U_o - R_i * I \quad \text{Gl. 3.2}$$

mit: U_o = ideale Spannung [V] & R = Innenwiderstand [Ω] & I = Strom [A]

Die Klemmenspannung sinkt mit zunehmender Stromstärke ab, kann sogar buchstäblich einbrechen. (RETZBACH, 2014)

3.3 Kapazität & C-Wert

Von der Kapazität C eines Akkumulators spricht man, wenn beschrieben werden soll, wie viel Strom der Akku über einen gewissen Zeitraum zur Verfügung stellen kann. Die Einheit der Kapazität ist Coulomb [C] (Nicht zu verwechseln mit dem Formelzeichen C, für die Kapazität eines Akkumulators), wird jedoch meist in Amperestunden [Ah] angegeben. Sie ist unbedingt von der elektrischen Kapazität eines Kondensators zu unterscheiden, welche in Farad [F] angegeben wird. Berechnet wird die Kapazität:

$$C = t * I \quad \text{Gl. 3.3}$$

mit: C = Kapazität [Ah] & I = Strom [A] & t = Zeit der Entladung [h]

Üblicherweise wird die Kapazität über einen Zeitraum von 5 Stunden ermittelt. Wenn ein Akku also 5 h lang 0,2 A Strom liefern kann, errechnet sich daraus eine Kapazität von:

$$5 h * 0,2 A = 1 Ah = 1000 mAh$$

Oft wird zur besseren Übersicht die Kapazität in Milliamperestunden [mAh] angegeben. Sie ist in der Regel auf den Akkumulator oder die Batterie aufgedruckt. Erstrebenswert seitens der Entwickler ist natürlich eine Steigerung der Kapazität, bei gleichbleibender Akkugröße. Dies hat meist den Nachteil, dass durch dieses Bestreben ein Anstieg des Innenwiderstands in Kauf genommen wird.

Vorsicht ist jedoch geboten, da bei unterschiedlichen Akkutypen die zur Verfügung

stehende Kapazität mehr oder minder stark auch vom Entladestrom abhängig ist. (RETZBACH, 2014)

Um einen schnellen Überblick über die Belastbarkeit oder die Schnellladefähigkeit eines Akkus zu erhalten, bedient man sich in der Praxis einer Hilfsgröße: Dem **C-Wert** oder auch **C-Rate**. Sie ist eine relative Größe bezogen auf die Kapazität. Sie definiert den Stromwert in Ampere, welcher der Kapazität entspricht. Hat ein Akku beispielsweise eine Kapazität von 2000 mAh und darf mit 1 C (nicht mit der Einheit Coulomb zu verwechseln!) geladen werden, entspricht das einem Ladestrom von 2000 mA. Wäre die C-Rate für das Laden 2 C, wäre der Strom:

$$2.000 \text{ mAh} * 2 \text{ C} = 4.000 \text{ mA} = 4 \text{ A}$$

Man könnte folglich 4 Ampere Ladestrom auf den Akku fließen lassen.

Bei Akkumulatoren ist meist die C-Rate für das Laden und Entladen angegeben. Der C-Wert für die Entladung ist in der Regel um ein vielfaches höher. Nehmen wir an, der oben erwähnte Akku mit 2000 mAh verfügt über eine Entladerate von 25 C:

$$2.000 \text{ mAh} * 25 \text{ C} = 50.000 \text{ mA} = 50 \text{ A}$$

Das heißt, der maximale Strom, den der Akku liefern kann, entspricht 50 A. Da für Elektromotoren, besonders in der Modelltechnik mitunter sehr hohe Stromstärken erforderlich sind, ist auch eine hohe C-Rate wünschenswert. (SCHULZ, 2014)

3.4 Energiedichte

Eine weitere wichtige Größe ist die Energie eines Akkus. Sie ist direkt gleichzusetzen mit seiner Leistungsfähigkeit. Energie ist bekanntlich Leistung mal Zeit. Die Leistung P [W] eines Akkus berechnet sich einfach aus dem Produkt des Entladestroms I [A] und der Entladespannung U [V]:

$$P = U * I$$

Gl. 3.4

mit: **P** = Leistung [W] & **U** = Spannung [V] & **I** = Strom [A]

Um nun auf den Wert der Energie E [Wh] eines Akkus zu gelangen, multiplizieren wir die Leistung mit der Entladezeit t [h].

$$E = P * t = U * I * t$$

Gl. 3.5

mit: E = Energie [Wh] & P = Leistung [W] & t = Zeit [h]

Die Energie ist verantwortlich für die Dauer, mit der ein gewisser Verbraucher versorgt werden kann.

In der Modelltechnik, speziell für Flugmodelle, ist die **Energiedichte** ein weiterer wichtiger Begriff. Sie beschreibt die mögliche gespeicherte Energie bezogen auf das Volumen des Akkus. Sie wird in Wh/cm³ angegeben.

Häufig ist das Gewicht allerdings eine entscheidendere Größe, als das Volumen. So wird auch oft von der massenbezogenen Energiedichte gesprochen. Ihre Maßeinheit ist Wh/kg.

Gängige Bleiakkus erreichen ca. einen Wert von 60 Wh/kg, Li-Ion-Akkus hingegen beispielsweise ca. 120-200 Wh/kg.

3.5 Zyklenzahl

Wenn ein Akku einmal geladen und anschließend wieder entladen wird, spricht man von einem Zyklus. Wird dieser Vorgang bis zur maximalen Lad- bzw. Entladbarkeit durchgeführt, spricht man von einem Vollzyklus.

Mit der sogenannten Zyklenzahl kann nun die Lebenserwartung eines Akkus beschrieben werden. Spricht man beispielsweise bei einem Akku von einer Zyklenzahl von 2.000, dann bedeutet dies, dass er 2.000 mal Entladen und erneut Geladen werden kann.

Diese Zahlen sind jedoch nur ein grober Richtwert, da sie die Verwendung des Akkus unter Idealbedingungen voraussetzen, was nur in seltensten Fällen zutrifft. Wird mit einem Akku schroff umgegangen, so kann sich seine Zyklenzahl drastisch reduzieren. (SCHULZ, 2014)

4. Nickelakkumulatoren

4.1 Der Nickel-Cadmium-Akkumulator

Der NiCd-Akkumulator ist neben dem Bleiakku einer der ältesten Akkumulatortypen. Wie aus Tabelle 3 (siehe S. 19) entnommen werden kann, hat eine NiCd-Zelle eine Nennspannung von 1,2 V. Ihre Entladespannung beträgt 0,9 V, ihre Ladeschlussspannung 1,35 V. Durch die relativ hohe Selbstentladung von monatlich 15 – 20% eignet er sich nur für Anwendungsbereiche, bei denen eine regelmäßige Nutzung und Ladung sichergestellt ist. Der NiCd-Akku hat eine Lebensdauer von ungefähr 1.000 Ladezyklen.

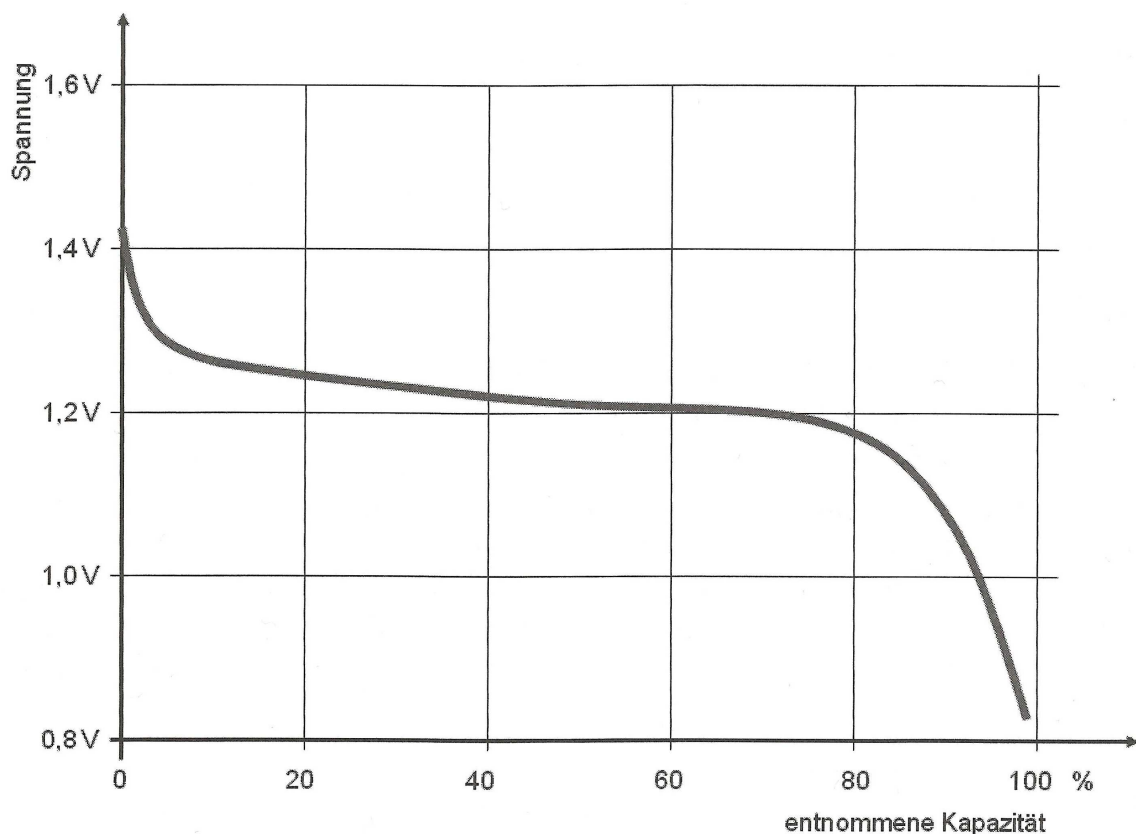


Abbildung 7: Spannungsverlauf eines NiCd-Akkus - SCHULZ, 2014a, S. 51

Durch ihren geringen Innenwiderstand ist es einem NiCd-Akkumulator möglich, hohe Ströme abzugeben. Auch haben NiCd-Akkus den großen Vorteil, dass die Akkuspannung über die Entladedauer nahezu gleich bleibt und sie erst kurz vor

der Erschöpfung einbricht, was es ermöglicht Verbraucher mit einer nahezu konstanten Spannung zu versorgen.

Obwohl eine Entladespannung von unter 0,9 V tunlichst zu vermeiden ist, um Schädigungen am Akku zu verhindern, ist auch darauf zu achten, dass ein NiCd-Akkumulator vollständig entladen ist, bevor man ihn erneut lädt (siehe 4.3.1). Ein teilweises entladen und neu laden, wie beispielsweise bei einem LiPo-Akkumulator, verringert beim NiCd-Akku stark die Lebensdauer. Viele NiCd-Ladegeräte bieten daher die Möglichkeit, den Akku zu entladen, um in dann von Grund auf neu zu laden.

Das größte Manko des NiCd-Akkumulators ist das verbaute Cadmium. Dieses ist sehr schädlich für die Umwelt, da es krebserregend ist und Gewässer verseuchen kann. Das steigende Umweltbewusstsein führte zwangsläufig zur Einschränkung dieser Technologie. Seit 2004 versucht man die Nutzung von Cadmium zur Akku- und Batterieherstellung zu vermeiden. EU-weit sind NiCd-Akkus seit 2013 per Gesetz verboten. Es besteht eine Übergangsfrist bis zum 31. Januar 2016. Nach diesem Datum dürfen NiCd-Akkumulatoren nur noch in speziellen Ausnahmefällen für Notsysteme verwendet werden. Damit steht das Ende dieser Akku-Technologie im europäischen Raum endgültig fest. (SCHULZ, 2014)

4.2 Der Nickel-Metallhydrid-Akkumulator

Mit dem zeitlich immer stärker werdenden Blick auf die Umweltverträglichkeit von Akkumulatoren, begann man in den 1980er Jahren eine Alternative für das giftige Cadmium zu finden. Es bot sich an, als Ersatz Wasserstoff (H_2) einzusetzen. Die Problematik bestand darin, dass Wasserstoff bei Raumtemperatur gasförmig ist. Da man es vermeiden wollte, die Akkuzellen unter Druck zu setzen, behelfen sich die Entwickler einer schon länger bekannten Eigenschaft des Wasserstoffs. Bei einigen metallischen Legierungen wie z.B. Lanthan-Nickel oder Titan-Nickel konnte sich das Wasserstoffgas in das Kristallgitter einlagern. Daher heißen diese Legierungen auch Metallhydrid-Speicher.

Ein NiMH-Akku hat prinzipiell den gleichen Aufbau wie ein NiCd-Akkumulator. Dies

führt dazu, dass er sehr ähnliche Eigenschaften besitzt. Seine Nennspannung beträgt ebenfalls 1,2 V, genau wie seine Ladeschlussspannung 1,35 V beträgt. Die minimale Zellen-Entladespannung liegt mit 1,0 V etwas höher. Anfangs hatte man das Problem, dass die Ladezyklen deutlich geringer ausfielen. Die ersten NiMH-Akkus hatten lediglich eine Zyklenzahl von 300. Dieses Defizit bekam man allerdings mit fortschreitender Technologie in den Griff, sodass leistungsgesteigerte Varianten des NiMH-Akkus mit einer Zyklenzahl von bis zu 1.800 sogar öfter aufladbar sind als ihr Vorgängermodell, der NiCd-Akkumulator (bis zu 1.000 Zyklen). Die monatliche Selbstentladung ist mit 20 – 30% jedoch höher als beim NiCd-Akku (15 – 20%). (SCHULZ, 2014)

Man machte weiterhin große Fortschritte im Bereich des Innenwiderstands. Dieser wurde immer weiter reduziert, sodass auch die Hochstromfähigkeit von NiMH-Akkumulatoren verbessert wurde.

Der wahrscheinlich größte Vorteil eines Akkus auf Nickel-Metallhydrid-Basis gegenüber einem auf Nickel-Cadmium-Basis, ist die fast doppelt so hohe Nennkapazität bei gleichbleibender Zellgröße. Dies führt folglich dazu, dass der NiMH-Akku mit einer Energiedichte von ca. 80 Wh/kg seinem Vorgänger klar überlegen ist. Auch den Vorteil der fast konstanten Spannung über den Entladezeitraum kann diese Technologie beibehalten. Mitunter kann dies jedoch auch als Nachteil ausgelegt werden, da es durch die sehr flach verlaufende Kurve (siehe Abb. 7, S.24) schwierig ist, Rückschlüsse über den Ladezustand des Akkumulators zu treffen, was beim NiCd-Akkumulator jedoch ebenfalls der Fall ist.

Auch wenn NiMH-Akkus im Gegensatz zu NiCd-Akkus keinen Memory-Effekt (siehe 4.3.1) haben und somit vor dem Aufladen nicht entladen werden müssen, leiden sie unter dem Lazy-Effekt (siehe 4.3.2). Dieser führt dazu, dass sich mit jedem erneuten Ladevorgang, welcher nicht von der Entladespannung (1,0 V pro Zelle) aus gestartet wird, sich die Spannungskurve etwas nach unten verschiebt. Der Effekt ist jedoch nicht so drastisch wie bei einem Akku auf Nickel-Cadmium-Basis, bei welchem jeder Ladevorgang von entladenen Zellen aus gestartet werden muss. Als Faustregel gilt für NiMH-Akkus: Bei jedem zehnten Ladevorgang den

Akku zuerst vollständig entladen.

Allerdings hat der NiMH-Akkumulator nicht nur Vorteile gegenüber seiner Vorgängertechnologie. Sie sind mit Bezug auf ihren eingesetzten Temperaturbereich um einiges empfindlicher im Gegensatz zu NiCd-Akkus. Sie sind bei Temperaturen unterhalb von 0° C und über 40° C nur sehr eingeschränkt zu gebrauchen. Ab -20° C sind sie sogar völlig unbrauchbar. Hingegen ist der NiCd-Akkumulator selbst bei -40° C noch mit 50% seiner Kapazität zu verwenden. (SCHULZ, 2014)

Auch ist der NiMH-Akku deutlich empfindlicher bei der Ladegeschwindigkeit und der Überladefähigkeit, sowie bei Tiefenentladung. Bei wiederholtem Über- und Tiefentladung sinkt der Lebenszyklus eines NiMH-Akkus schnell unter 50 Zyklen. (SCHULZ, 2014)

Der NiMH-Akkumulator ist auch kein Freund von großen Strömen. Als Faustregel gilt: Um aus dem Akku die volle Zyklenzahl herauszuholen, sollte der Strom nicht mehr als 50 % der Kapazität betragen. Bei einem 4.000-mAh-Akku wären das 2 A. Auch wenn der Akku durchaus in der Lage ist, höhere Ströme abzugeben, so geht dies doch drastisch auf die erreichbaren Ladezyklen. Um den Akku weiterhin zu schonen, sollte man ihn konstanten Belastungen aussetzen. NiMH-Akkus reagieren sehr empfindlich auf stark schwankende Stromstärken. Es sollte folglich vermieden werden, den Akku in verschiedenen Geräten einzusetzen. (SCHULZ, 2014)

4.2.1 Der LSD-NiMH-Akkumulator

Da ein gewöhnlicher Nickel-Metallhydrid-Akku eine sehr hohe Selbstentladerate aufweist, versuchten die Entwickler sehr bald diesem Effekt entgegen zu wirken. Das Resultat war der Low-Self-Discharge-NiMH-Akku, kurz LSD. Durch eine neuartige Kristallgitter-Legierung für die Kathode konnte der chemische Zerfall drastisch reduziert werden.

Da ein normaler NiMH-Akku in den ersten 24 Stunden nach seiner Aufladung rund 10 % seiner Ladung wieder verloren hat, eignet er sich nicht für Anwendungsbereiche, in denen der Akkumulator nur kurzzeitig, aber über einen langen Zeitraum ge-

nutzt wird. Der LSD-NiMH-Akku hingegen hält ca. 30 Tage durch, bis er 10 % seiner Ladung verloren hat. Darüber hinaus stabilisiert sich dieser Kapazitätsverlust im Laufe der Zeit zunehmend. So hat ein LSD-NiMH-Akku selbst nach einem Jahr noch eine Kapazität von 85 %, während ein gewöhnlicher Nickel-Metallhydrid-Akku in dem selben Zeitraum bereits auf unter 5 % gesunken wäre. (SCHULZ, 2014)

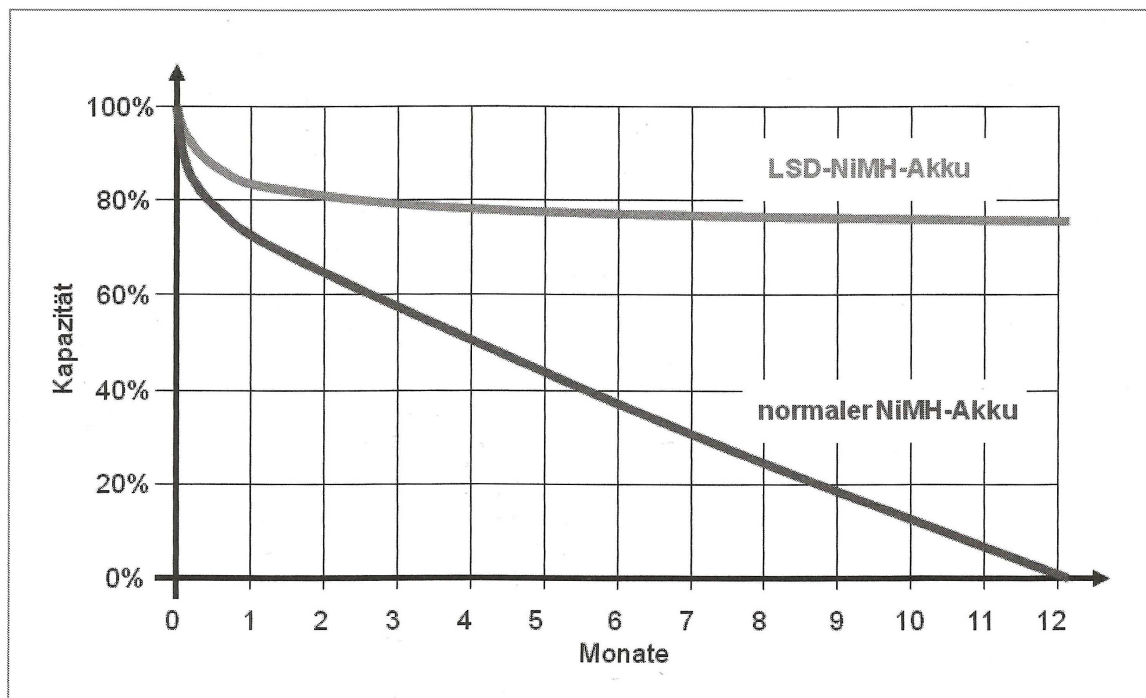


Abbildung 8: Gegenüberstellung der Entladekurve - SCHULZ, 2014a, S.71

Diese Fähigkeit, über einen sehr langen Zeitraum den Großteil der Kapazität halten zu können, macht den LSD-NiMH-Akku sehr beliebt für Anwendungen mit unregelmäßigem Strombedarf. Ein gutes Beispiel ist hier die Stromversorgung von Fernsteuerungen. Oft sind diese als geschlossenes System (siehe 2.2) ausgeführt, wodurch ein extra Ladegeräte überflüssig ist.

Ein LSD-NiMH-Akku ist gegenüber seiner Ursprungsvariante auch deutlich unempfindlicher gegen Tiefent- und Überladung. Auch wenn dies wie beim NiMH-Akkumulator deutlich die Lebensdauer des Akkus beeinflusst. Des Weiteren ist er auch in einem größeren Temperaturbereich einsetzbar, beispielsweise ist er auch bei Temperaturen unter 0 °C noch funktionsfähig. (SCHULZ, 2014)

4.3 Negative Effekte

4.3.1 Der Memory-Effekt

Eine Eigenschaft die sowohl bei NiCd-, als auch bei NiMH-Akkumulatoren berücksichtigt werden muss, ist der Memory- bzw. Lazy-Effekt. Beide Begleiterscheinungen treten auf, wenn der Akkumulator wiederholt lediglich teil-entladen wird. Der Memory-Effekt tritt bei NiCd-Akkumulatoren, der Lazy-Effekt bei NiMH-Akkus auf.

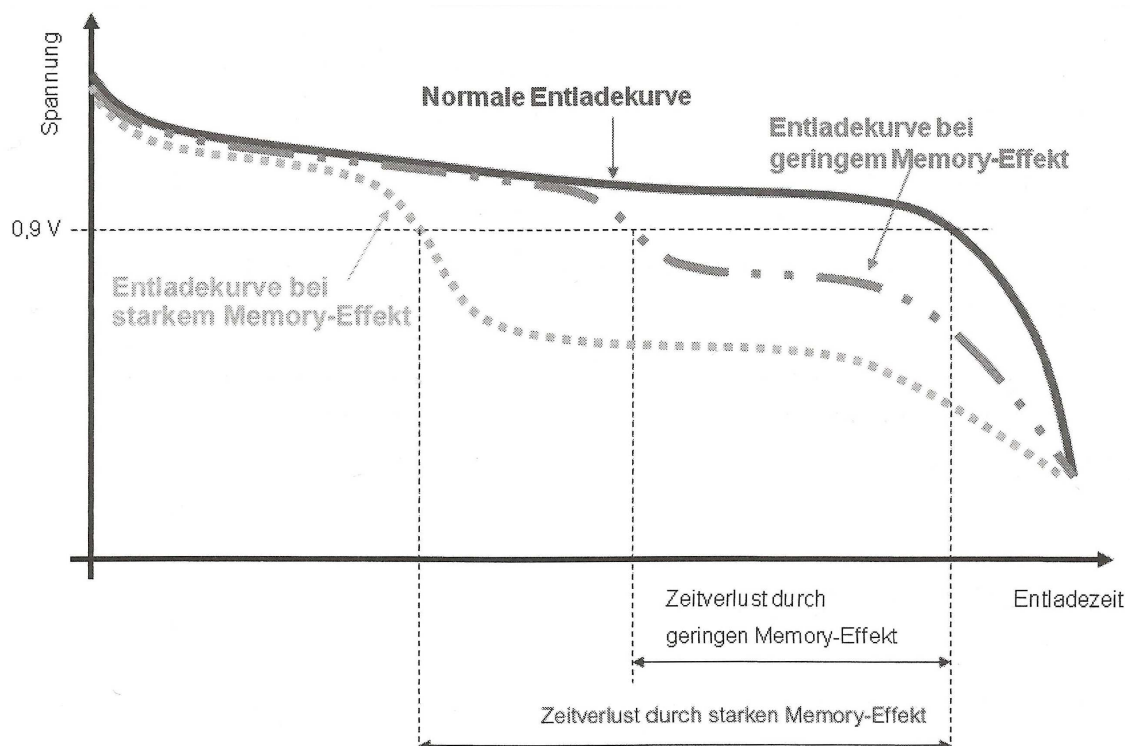


Abbildung 9: Memory-Effekt - SCHULZ, 2014a, S. 69

Der Memory-Effekt hat deutlich größere Auswirkungen auf die Leistungsfähigkeit eines Akkus und kann diesen schnell nahezu unbrauchbar machen. Mit einer stets nur teilweise Entladung der Zellen, beginnt der Akku sich den gelieferten Energiebedarf „zu merken“. Der Akku gibt nun lediglich die gewohnte Energiemenge ab, was einen früheren Spannungsabfall zur Folge hat. (SCHULZ, 2014)

4.3.2 Lazy-Effekt

Auch der Lazy-Effekt (oft auch Batterieträgheitseffekt genannt) reduziert die Kapazität eines Akkumulators. Er tritt nur bei NiMH-Akkus auf. Der Effekt zeigt sich nicht schlagartig, sondern verstärkt sich mit der Nutzungsdauer des Akkus mehr und mehr. Er zeichnet sich dadurch aus, dass sich die Entladekurve allmählich nach unten verschiebt (siehe Abb. 9, S. 29).

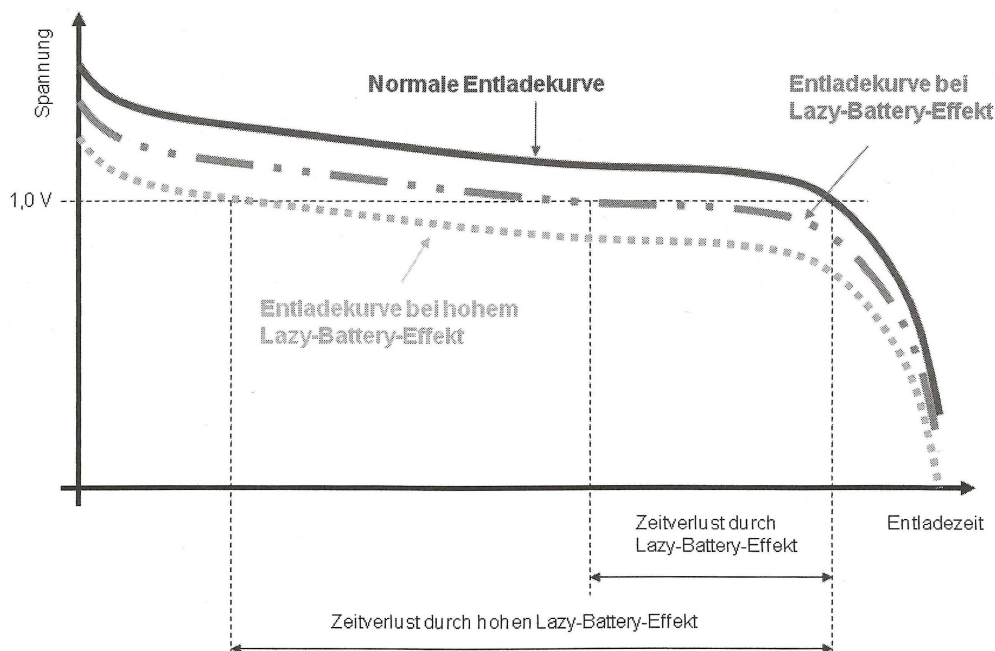


Abbildung 10: Lazy-Effekt - SCHULZ, 2014a, S. 69

Durch das Senken der Entladekurve wird die Entladeschlussspannung schneller erreicht, was zu einer Reduzierung der Gesamtkapazität des Akkus führt. Genau wie beim Memory-Effekt, tritt der Batterieträgheitseffekt durch das nicht vollständige Entladen des Akkus auf. Seine Kapazität wird nicht völlig beansprucht, der Akku wird also „träge“. Je öfter der Akku nur teilweise entladen wird, desto stärker wird der Effekt. (SCHULZ, 2014)

Durch den technischen Fortschritt in der Entwicklung wurde der Effekt jedoch schon stark minimiert. Diese Batterieträgheit ist kein bleibender Schaden am Akku und kann rückgängig gemacht werden. Dazu ist der Akkumulator einfach mehrere Male vollständig zu Entladen und erneut Aufzuladen. Dieser Vorgang sollte zwei- bis fünfmal durchgeführt werden, um den Effekt vollständig zu beseitigen.

5. Lithiumakkumulatoren

5.1 Lithium-Ionen-Akkumulator

Wenn man von einem Lithium-Ionen-Akku spricht, meint man nicht einen speziellen Akkutyp. Die Bezeichnung wird viel mehr als eine Art Oberbegriff verwendet, hinter dem sich die verschiedensten Akkumulatortypen verbergen können.

Akkumulatoren auf Lithium-Basis sind eine relativ neue Technologie. Der erste serienmäßig produzierte Li-Ion-Akku wurde 1991 von Sony auf den Markt gebracht. Sie zeichnen sich durch ihre hohe Nennspannung, sowie ihre hohe Kapazität aus. Diese Eigenschaften führten dazu, dass diese Sorte von Akkumulatoren schnell Anklang in der Verwendung bei mobilen Kleingeräten wie Notebooks, Kameras oder Mobiltelefonen fand. Durch seine hohe spezifische Energie erfreut der Li-Ion-Akku sich großer Beliebtheit. Bei vielen Akkumulatoren ist nicht immer gleich ersichtlich, um welche Form des Lithium-Ionen-Akkus es sich handelt. Durch die angegebene Zellspannung und den Einsatzort lässt sich jedoch leicht erschließen, welches Kathodenmaterial verwendet wird. (SCHULZ, 2014)

Verstärkter Blick auf den Sicherheitsaspekt ist jedoch vorauszusetzen, da diese Lithium-basierte Technologie sehr empfindlich auf Über- und Tiefenentladung reagiert. Im Gegensatz zu Akkus auf Nickel-Basis, haben Li-Ion-Akkus jedoch weder Memory- noch Lazy-Effekt. Auch ihre geringe Selbstentladung kommt ihnen zu gute. Moderne Li-Ion-Akkumulatoren sind auch in der Lage hohe Dauer- und Spitzenströme abzugeben.

Auch in der Modelltechnik finden Li-Ion-Akkus Verwendung, sind jedoch fast gänzlich von den leistungsstärkeren Lithium-Polymer-Akkumulatoren (siehe 5.2) abgelöst worden. (SCHULZ, 2014)

5.1.1 Funktionsprinzip

Der Lithium-Akku zeichnet sich dadurch aus, dass sowohl die Kathode, als auch die Anode, sowie der Elektrolyt Lithium-Ionen enthält.

Idealerweise wäre es, die negative Elektrode aus reinem Lithium zu konstruieren.

Dies ist jedoch aus mehreren Gründen praktisch nicht realisierbar. Einer der Hauptgründe ist, dass reines Lithium stark reaktionsfreudig ist. Das hat zur Folge, dass für Lithium-Ionen-Akkus mit reinem Lithium keine wässrigen Elektrolyte verwendet werden könnten. Auch eine Beschädigung des Separators durch das Lithium ist nicht auszuschließen, was im schlimmsten Fall einen Kurzschluss zur Folge haben kann.

Deshalb wird das Lithium in einem sogenannten Wirtsmaterial eingelagert. In der Regel ist das Graphit. Graphit kann in seinen C_6 -Ringen je ein Lithiumion einlagern. Die Eigenschaften eines Lithium-Ionen-Akkus hängen stark vom verwendeten Material der Kathode ab. Hier gibt es eine Vielzahl von Möglichkeiten, auf die weiter unten eingegangen wird. Zur Erläuterung der Funktionsweise, wird hier ein Lithium-Kobalt-Akku, welcher der klassische Li-Ion-Akku ist, herangeführt. Bei ihm besteht die Kathode aus Lithium-Kobalt-Dioxid ($LiCoO_2$).

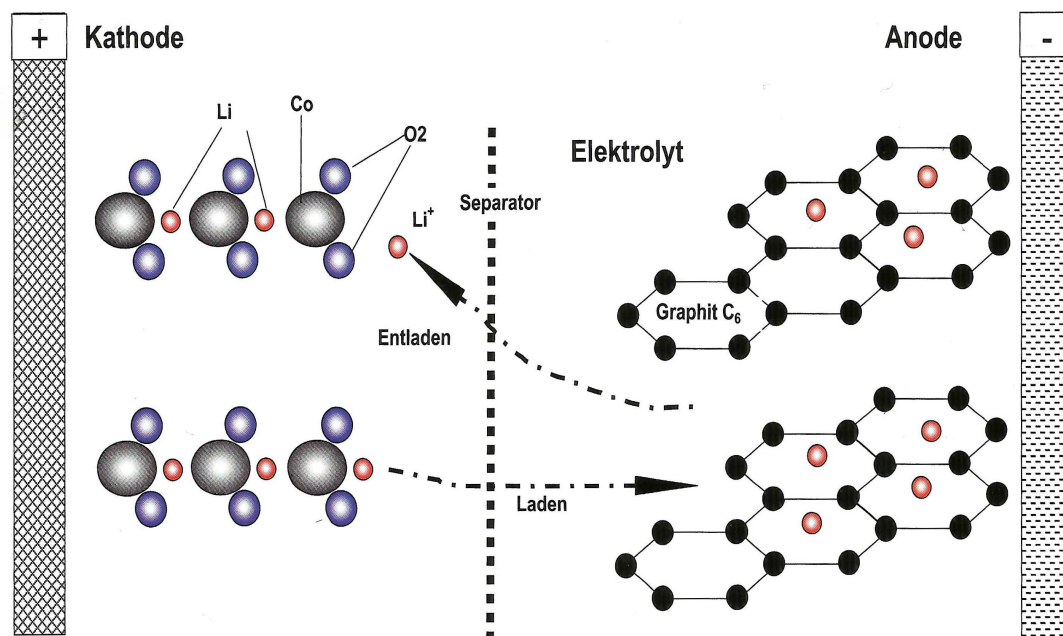


Abbildung 11: Funktionsprinzip eines Lithium-Ionen-Akkus - RETZBACH, 2014a, S.104

Beim Ladevorgang eines Li-Ion-Akkus werden, durch anliegenden Strom, Elektronen von der Kathode zur Anode transportiert. Die entzogenen Elektronen auf der Plus-Seite führen dazu, dass sich die Lithium-Atome abspalten und zu Lithium-Ionen werden. Diese positiv geladenen Ionen wandern nun durch den Separator

zum Minus-Pol, wo sie sich im Graphit ablagern. Durch die vom Ladegerät zum Minus-Pol transportierten Elektronen, neutralisieren sich die Lithium-Ionen dort wieder. Durch die Migration der Lithium-Ionen entsteht ein Spannungsunterschied zwischen den Polen, welcher mit fortschreitendem Prozess messbar ansteigt.

Die Empfindlichkeit bezüglich Überladung eines Lithium-Ionen-Akkus beruht hauptsächlich darauf, dass dem Kathodenmaterial nicht unbegrenzt Lithium-Atome entzogen werden dürfen, da es sonst seine chemische Stabilität verliert. Auch die Einlagerung der Lithium-Ionen im Graphit haben einen Volumenzuwachs zur Folge, was die Struktur des Graphits belastet. (RETZBACH, 2014)

Beim Entladevorgang kehrt sich der Prozess nun um. Durch einen angelegten Verbraucher an den Polen, kann ein Elektronenfluss stattfinden, und die Lithium-Ionen wandern zurück zu ihrem Ursprungsort. Jedoch ist auch beim Entladevorgang darauf zu achten, dass eine gewisse Entladespannung auf keinen Fall unterschritten wird. Sollte dies passieren, setzen sich chemische Prozesse in Gang, welche die Zelle irreversibel zerstören.

5.1.2 Lithium-Kobalt-Akkumulator

Wie der Name schon verrät und oben bereits erklärt, besteht die Kathode bei diesem Typ aus Lithium-Kobalt. Diese Form eines Li-Ion-Akkus ist die Älteste. Seine hohe Energiedichte von bis zu 190 Wh/kg führten zu einer weiten Verbreitung dieser Technologie. Der Lithium-Kobalt-Akku liefert eine Nennspannung von 3,6 V, welche er, ähnlich wie ein NiMH-Akku fast konstant über die Entladezeit abgibt.

Aufgrund seiner starken Empfindlichkeit gegen Über- und Tiefenentladung, sowie Erschütterungen, welche oft dazu führten, dass der Akku Feuer fing, oder gar explodierte, begann man rasch Alternativen zu suchen. (SCHULZ, 2014)

5.1.3 Lithium-Mangan-Akkumulator

Durch die Verwendung von Manganoxid (LiMn_2O_4) konnte die Sicherheit von Lithium-Ionen-Akkus deutlich verbessert werden. Auch die Herstellungskosten sind geringer, da das zur Produktion benötigte Material besser verfügbar war als Kobalt.

Mit einer Steigerung der Nennspannung auf 3,7 – 3,8 V, sowie durch das Reduzieren des Innenwiderstands, was dem Mangan geschuldet war, wurde der Lithium-Mangan-Akku in den verschiedensten Gebieten eingesetzt. Der reduzierte Innenwiderstand ermöglichte Ströme bis zu 50 A, was diese Technologie besonders für leistungsfähige Werkzeuge interessant machte.

Aufgrund seiner geringeren Energiedichte von ca. 120 Wh/kg, der Tatsache, dass bei einer Zellenspannung von unter 3 V die Leistung stark abnimmt und die Zelle schnell altert, gab man sich auch hier noch nicht zufrieden. (SCHULZ, 2014)

5.1.4 Lithium-Eisenphosphat-Akkumulator

Genau wie Mangan ist auch Eisenphosphat deutlich besser verfügbar als Kobalt. Was 1997 zur Entwicklung des Lithium-Eisenphosphat-Akkus, oder auch LiFe-Akku, führte. Wie der Name schon verlauten lässt, wird bei dieser Akku-Art die Kathode aus Lithium-Eisenphosphat (LiFePO_4) gebildet. Man spricht auch von LFP-Akkus. Die Anode besteht im Allgemeinen aus Graphit.

Seine relativ niedrige Energiedichte von ca. 100 Wh/kg und seine niedrige Zellspannung von ca. 3,2 V stellen den LiFe-Akku vermeintlich hinter andere Vertreter der Lithium-Ionen-Technologie zurück, jedoch gleicht er diese Aspekte mit seinen vielen Vorteilen wieder aus.

Im Vergleich zum Lithium-Kobalt-Akku und dem Lithium-Mangan-Akku hat der LiFe-Akku den Vorteil, dass alle Lithium-Ionen genutzt werden, da keine Gefährdung der chemischen Schichtstruktur gegeben ist. Aufgrund seiner chemischen Konstellation besitzt der LiFe-Akku eine hohe Eigensicherheit, da er weder zur Selbstentzündung noch zur Explosion neigt. (RETZBACH, 2014)

Einer der größten Schwächen von Akkumulatoren im Allgemeinen ist ihre Empfindlichkeit gegenüber hohen sowie tiefen Temperaturen. Hier zeichnet sich der LiFe-Akku durch Zuverlässigkeit und Robustheit aus. Auch wenn bei tieferen Temperaturen mit Spannungseinbrüchen zu rechnen ist, so erhält er doch weitestgehend seine Kapazität sogar in Bereichen von -45 bis +80 °C. (RETZBACH, 2014)

Auch seine enorme Schnellladefähigkeit der Zellen trägt zur Beliebtheit bei. Es

sind, je nach Ladetechnik, Ladeströme von 3 - 6 C realisierbar. Das führt dazu, dass diese Art Akku innerhalb von 15 – 20 Minuten wieder vollständig geladen ist.

Auch seine Langlebigkeit wird dem LiFe-Akku zugutegehalten. Seine hohe Zyklenzahl von bis zu 10.000 Zyklen, bei entsprechender Behandlung vorausgesetzt, machen ihn auch für Anwendungen interessant, bei denen der Energielieferant möglichst lange im Gerät bzw. der Maschine verweilen soll, ohne mit großem Aufwand getauscht werden zu müssen. Anwendungsgebiete hierfür wären beispielsweise U-Boote oder Elektrokraftfahrzeuge.

Die einzelnen Spannungsangaben sind nicht für jeden LiFe-Akku gleich. Sie hängen von der Bauart und dem Hersteller ab. So kann ein LiFe-Akku z.B. 3 V, ein anderer 3,3 V Nennspannung besitzen.

Vier 3 V Akkus in Reihe geschaltet eröffnen die Möglichkeit einen 12 V Blei-Akkumulator zu ersetzen. Da sich durch die guten Eigenschaften im Bezug auf Kapazität und Robustheit der LiFe-Akku gegenüber eines Blei-Akkus abhebt wird er immer öfter als Ersatz für Starterbatterien bei Kraftfahrzeugen eingesetzt. Hierdurch kann wertvoller Bauraum und Gewicht gespart werden.

Der LiFe-Akku hat sich seinen Bereich in den verschiedenen Anwendungsbereichen erkämpft und zählt auch heute (2015) noch zu den wichtigsten Akkumulatortypen.

5.2 Lithium-Polymer-Akkumulator

Der wohl bedeutendsten Akkutypen der letzten Jahre, besonders für die Modelltechnik, ist der Lithium-Polymer-Akku. Entwickelt wurde diese Technologie auf Lithium-Basis aufgrund des stetig wachsenden Energiehungers von Geräten in der Unterhaltungsindustrie. Innerhalb weniger Jahre löste der LiPo-Akku auf dem Gebiet der Flugmodelltechnik nahezu alle Nickel-basierten Akkumulatoren ab. Durch seine hohe Leistungsfähigkeit ist er auch im Bezug auf Flugmodellantriebe zur echten Alternative für den Antrieb mit Verbrenner-Motor geworden. Die vielen negativen Aspekte eines Verbrenners konnte man früher mit seiner enormen spezifischen Leistung rechtfertigen. Der LiPo-Akku kann natürlich ab einer gewissen

Größe des Modells auch nicht den Verbrenner-Motor ersetzen, jedoch wird er vermehrt für Modelle eingesetzt, bei denen Nickel-basierte Akkus einfach nicht genug Leistung aufbringen konnten.

Der LiPo-Akku zählt allerdings auch zu den empfindlichsten Akkus. Besonders Temperaturschwankungen machen ihm zu schaffen. Er ist lediglich im Bereich von 0 – 60 °C einsetzbar, da er sonst Schäden an den Zellen davonträgt. Weiterhin sollte er nicht im ungeladenen Zustand gelagert werden, da auch dies zu bleibenden Schäden führen kann. (PASSERN, 2013)

Eigentlich ist der Lithium-Polymer-Akku lediglich eine Abwandlung des Lithium-Ionen-Akkus, was sich in den vielen Gemeinsamkeiten widerspiegelt. Jedoch hat der LiPo-Akku durch seine Verwendung von Polymerstrukturen als Elektrolyt einige Vorteile gegenüber dem klassischen Lithium-Ionen-Akku, welcher oft auf flüssiges Elektrolyt setzt.

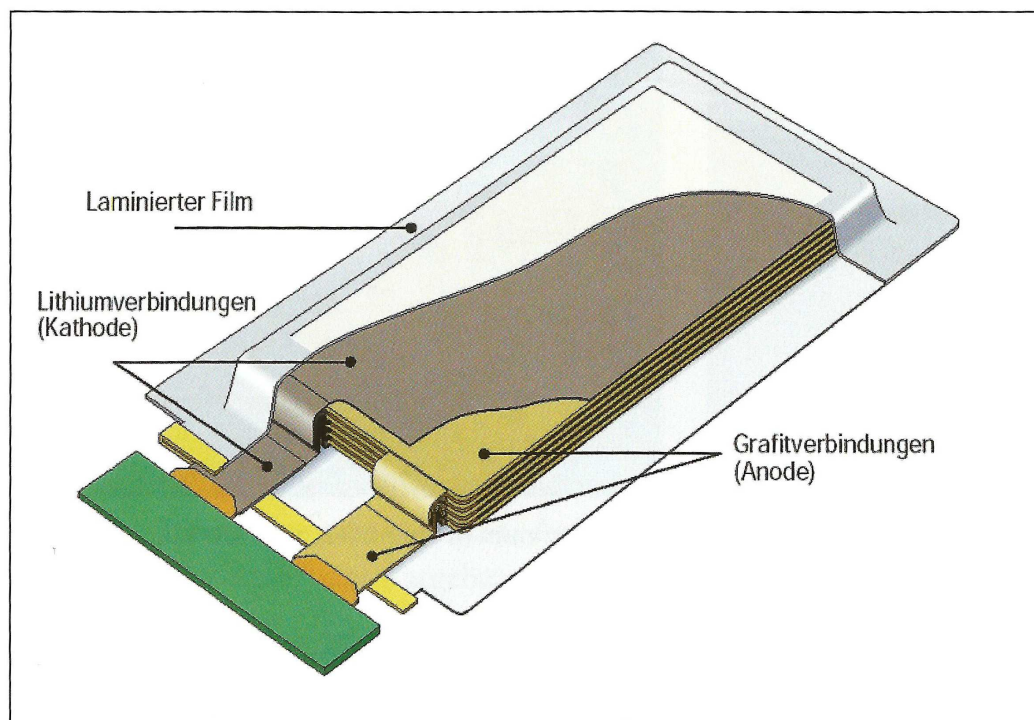


Abbildung 12: Aufbau einer Lithium-Polymer-Zelle - PASSERN 2013a, S. 14

Die Anode eines LiPo-Akkus besteht in der Regel aus Kohlenstoff, aber auch Graphit wird häufig verwendet. Für das Kathodenmaterial wird meist ein Lithium-

Metalloxid oder -Phosphat eingesetzt. (SCHULZ, 2014)

Durch das nicht flüssige Elektrolyt benötigt ein LiPo-Akkumulator auch keinen Schutz gegen Auslaufen. Dies ist der Grund, warum die Zellen diese Akkuvariante größtenteils lediglich mit Aluminium-Folie ummantelt sind. Das hat zum einen den Vorteil, dass so der Akku in praktisch jeder Form hergestellt werden kann und zum anderen führt es zu einer erheblichen Gewichtsreduzierung, was wiederum zu einer höheren massenbezogenen Energiedichte führt.

Der Lithium-Polymer-Akku zeichnet sich besonders durch seine hohe Energiedichte aus. Werte von 200 Wh/kg sind keine Seltenheit. Hochgezüchtete LiPo-Akkumulatoren erbringen sogar Energiedichten von bis zu 260 Wh/kg.



Abbildung 13: Hochleistungs-LiPo-Akku mit 260 Wh/kg - image.frompo.com

Diese Eigenschaft, viel Energie bei geringem Gewicht zu liefern und dabei erschwinglich zu bleiben, führte dazu, dass LiPo-Akkus vorrangig für Drohnen und Flugmodelle eingesetzt werden, da es besonders hier auf ein niedriges Gewicht ankommt.

Die fehlende Schutzhülle hat jedoch den Nachteil, dass der Akku sehr anfällig gegenüber äußeren Einflüssen ist. Besonders bei Abstürzen ist die Gefahr sehr groß. Ein Durchbohren, Stauchen oder Verbiegen eines LiPo-Akku hat seine Zerstörung zur Folge. Diese rührt in der Regel aus der Beschädigung des Separators, was einen Kurzschluss innerhalb der Zelle mit sich führt. Daraus resultieren sehr hohe

Ströme, was im Extremfall zum Akkubrand oder gar zur Explosion führen kann.

Auch die höhere Brandgefahr eines LiPo-Akkus führte dazu, dass im Bereich der Kleingeräteindustrie, wie beispielsweise für Smartphones oder Tablets, man sich eher wieder weg vom LiPo- und hin zum Lilon-Akku zu richten beginnt. Auch wenn der LiPo-Akku sehr gut geeignet für diese Anwendungsbereiche ist, so ist seine Fähigkeit zur Abgabe von hohen Strömen eher uninteressant. Vor Allem die höheren Produktionskosten gegenüber Lithium-Ionen-Akkus sprechen in dieser Branche gegen ihn, da stets versucht wird, die Herstellungskosten für das Endprodukt so niedrig wie möglich zu halten. (SCHULZ, 2014)

5.2.1 Balancer und Equalizer

Da eine Lithium-Polymer-Zelle extrem empfindlich auf Überladung reagiert, ist es unumgänglich, dass bei miteinander verschalteten Zellen (siehe 7.) stets darauf geachtet wird, dass alle Zellen die gleiche Spannung besitzen. Diese Überwachungsfunktion wird durch sogenannte Balancer bzw. Equalizer garantiert.

Ein Balancer wird direkt mit den einzelnen Zellen des LiPo-Akkumulators verbunden und überwacht die einzelnen Zellspannungen. Entsprechende Kabel sind an jedem mehrzelligen LiPo-Akku verbaut. Der Balancer wird nun im Bereich des Ladeschlusses aktiv. Erreicht beim Ladevorgang eine Zelle den Grenzwert von 4,2 V, so lenkt der Balancer den Ladestrom für diese Zelle über einen Heizwiderstand, sodass diese nicht weiter aufgeladen wird. Hierdurch wird verhindert, dass die entsprechende Zelle überladen wird, die verbleibenden Zellen jedoch weiter bis zur maximalen Ladespannung von 4,2 V aufgeladen werden. (PASSERN, 2013)

Eine weiterentwickelte Form des Balancers ist der Equalizer. Er vermag nicht nur die einzelnen Zellen vor dem Überladen zu schützen, sondern auch im Ruhezustand die Zellspannungen aneinander anzugleichen. Auch registriert ein Equalizer, falls gewisse Werte einer Zelle außerhalb der Norm liegen, was mit einem Defekt der Zelle gleichzusetzen ist. Der Equalizer stoppt dann umgehend den Ladevorgang. (PASSERN, 2013)

Es ist unbedingt zu raten, einen LiPo-Akkumulator nur mit angeschlossenem Balancer bzw. Equalizer zu laden, da andernfalls der LiPo-Akku schon nach wenigen Ladezyklen irreparable Schäden davonträgt und unbrauchbar wird.

5.2.2 Tiefentladeschutz

Aber nicht nur auf Überladung reagieren die LiPo-Zellen empfindlich auch ein zu starkes Entladen kann den Akku schwer schädigen. Häufig wird in der Praxis nicht berücksichtigt, dass eine Tiefentladung dem LiPo-Akku genauso schwer zusetzt wie eine Überladung. Viele Anwender benutzen deshalb zwar Balancer und Equalizer zum Schutz vor einer Überladung der Zellen, vernachlässigen jedoch die Überwachung beim Entladen des Akkus.

Bemerkt man beispielsweise eine nachlassende Motorleistung beim Flugmodell, ist das schon der Beginn der Tiefentladung beim LiPo-Akku. Für einzelne Zellen im benutzen Akkus kann dies schon drastische Folgen haben.

Abhilfe schafft hier bestimmte Sicherheitselektronik. Die einfachste ist ein LiPo-Tiefentladeschutz. Dieser wird zwischen der Empfängerelektronik und dem Motorregler zwischengeschaltet und mit den Balancerkabeln des LiPo-Akkus verbunden. Registriert der Tiefentladeschutz nun ein Überschreiten der Grenzwertspannung bei einer Zelle, regelt er die Motorleistung merklich herunter. Dies signalisiert dem Piloten ein Ende der Flugzeit, bedingt durch das Aufbrauchen der vorhandenen Akku-Kapazität.

Eine weitere, durchaus komfortablere Variante, ist eine Rückübertragung der Telemetriedaten an den Sender. Notwendig hierfür ist die Nutzung eines 2,4-GHz-Senders. Mit speziell dafür ausgelegten Motorreglern kann die aktuelle Spannung des Akkus über den Empfänger zurück an den Sender übertragen werden. Die Spannung des Akkus kann somit auf dem Display des Senders angezeigt werden und der Pilot hat stets einen groben Richtwert für die noch verbleibende Kapazität.

6. Übersicht und Vergleiche

Die hier aufgeführten Werte gelten lediglich als grobe Richtwerte und entsprechen gängigen Akkumulatoren aus der Praxis, wie sie im Handel erworben werden können. (RETBACH, 2014)

	NiCd	NiMH	Lilon	LiFe	LiPo
Nennspannung	1,2 V	1,2 V	3,7 V	3,2 V	3,7 V
Ladeschlussspannung	-	-	4,2 V	3,6 V	4,2 V
Zulässige Entladetiefe	0,9 V	0,8 V	2,5 V	2,0 V	2,5 V
Maximale Laderate	4 C	1,5 C	1 C	4 C	1 C
Spezifische Energie	40 – 50 Wh/kg	50 – 80 Wh/kg	120 – 240 Wh/kg	100 – 120 Wh/kg	110 – 180 Wh/kg
Maximale Entladerate	20 C	10 C	20 C	30 C	40 C
Empfohlener Lagerzustand	entladen	geladen	~ 3,8 V	~ 3,3 V	~ 3,8 V
Zyklenzahl	~ 1000	~ 500	~ 1000	~ 5000	~ 500

Tabelle 4: Gegenüberstellung verschiedener Akkutechnologien - nach RETZBACH, 2014a, S. 134 (verändert)

7. Akkusaltung

Da eine einzelne Akkuzelle nur in den seltensten Fällen genug Spannung und Strom aufbringt, um den Verbraucher zufriedenstellend zu betreiben, werden häufig die einzelnen Zellen miteinander verschaltet. Ist dies der Fall, spricht man von einem Akkublock. Es gibt zwei Möglichkeiten Zellen zu verschalten. Die eine ist die Serienschaltung (siehe 7.1) die andere die Parallelschaltung (siehe 7.2). Die Anzahl der verschalteten Zellen ist bei beiden Varianten beliebig. Diese Varianten können auch miteinander kombiniert werden.

7.1 Serienschaltung

Von einer Serien- oder auch Reihenschaltung spricht man, wenn die einzelnen Zellen, wie der Name schon sagt, in Reihe hintereinander geschaltet werden.

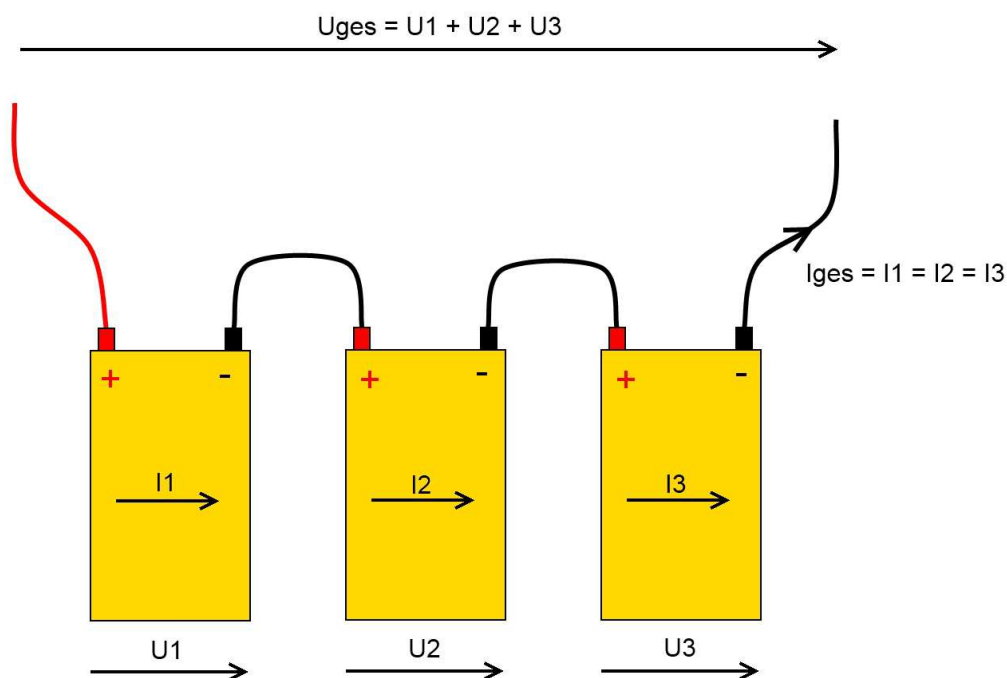


Abbildung 14: Prinzip einer Serienschaltung

Bei einer Serienschaltung ergibt sich die resultierende Gesamtspannung aus der Summe aller einzelnen Zellspannungen. Zu beachten ist, dass sich auch die Innenwiderstände der Zellen aufsummieren:

$$R_{ges} = N * R$$

Gl. 7.1

mit: **N** = Anzahl der Zellen & **R** = Innenwiderstand einer Zelle

Durch alle Zellen fließt jedoch der gleiche Strom. Auch die Kapazität bleibt hier gleich, da die Zellen die Energie gleichzeitig abgeben. (SCHULZ, 2014)

Beispielsweise hat eine LiPo-Zelle eine Nennspannung von 3,7 V. Schaltet man nun zwei dieser Zellen in Reihe, ergibt sich eine Nennspannung von:

$$U_1 + U_2 = U_{ges}$$

Gl. 7.2

$$3,7V + 3,7V = 7,4V$$

Hier muss berücksichtigt werden, dass nur Zellen gleichen Typs und gleichen Ladestands miteinander verschaltet werden dürfen, da sonst etwaige Ausgleichsströme die Leistung des Akkublocks beeinträchtigen oder die Zellen gar zerstören können. Ebenfalls zu beachten ist, dass die schwächste Zelle die Grenzen der Leistungsfähigkeit definiert.

Auch bei gleichen Zellen kann sich jedoch mit der Zeit ein unterschiedliches Spannungsniveau einstellen. Dies ist besonders bei LiPo-Akkumulatoren zu vermeiden. Diese Aufgabe kommt beim Laden dem Balancer bzw. dem Equalizer zu (siehe 5.2.1). (PASSERN, 2013)

Geht man nun davon aus, dass stets die gleichen Zellen verwendet werden, also $U_1 = U_2 = U_3$ ist, lässt dies auch Rückschlüsse auf die Anzahl der Zellen zu. Eine Autobatterie hat bekanntlich eine Nennspannung von 12 V. Eine einzelne Blei-Bleioxid-Zelle hat 2,0 V Nennspannung (siehe Tabelle 3, S. 19). Daraus ergibt sich:

$$\frac{U_{ges}}{U} = N$$

Gl. 7.3

$$\frac{12V}{2V} = 6$$

Eine handelsübliche Fahrzeugbatterie besteht also aus sechs in Reihe geschalteten Blei-Bleioxid-Zellen.

7.2 Parallelschaltung

Von einer Parallelschaltung spricht man, wenn alle gleichnamigen Pole der Zellen miteinander leitend verbunden werden.

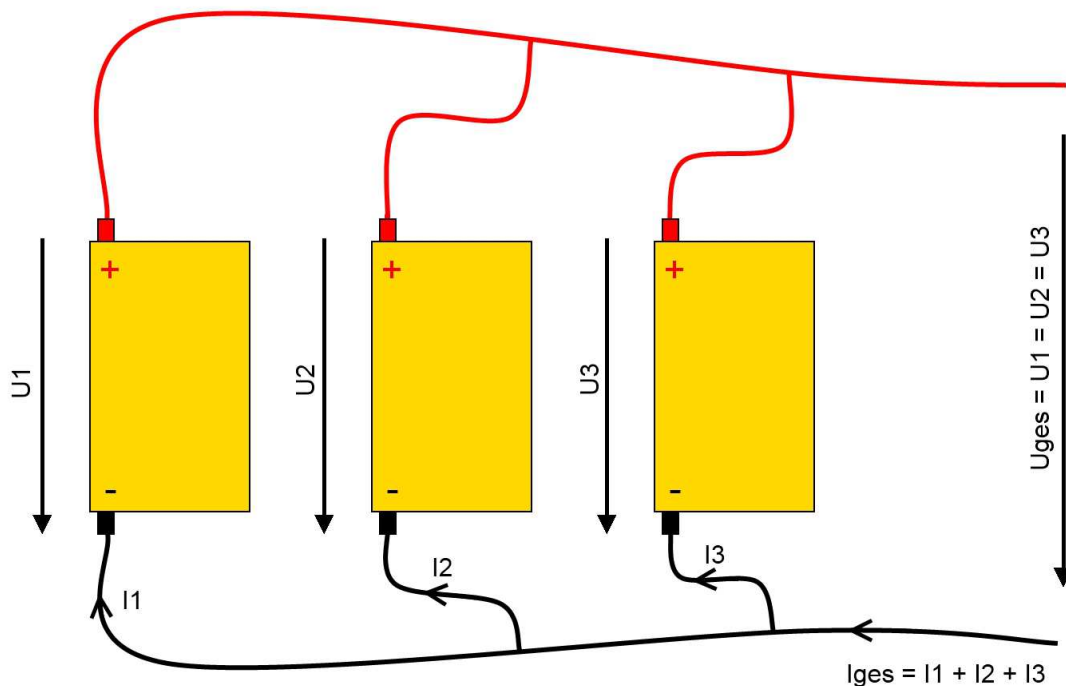


Abbildung 15: Prinzip einer Parallelschaltung

Hierbei addieren sich alle einzelnen Ströme zum Gesamtstrom I_{ges} . Folglich liefern drei parallel verschaltete Zellen den dreifachen Strom. Gleichzeitig reduziert sich der Innenwiderstand des gesamten Akkublocks R_{ges} . Er lässt sich berechnen mit:

$$\boxed{R_{ges} = \frac{R}{N}} \quad \text{Gl. 7.4}$$

mit: N = Anzahl der Zellen & R = Innenwiderstand einer Zelle [Ω]

Neben den Strömen addiert sich auch die Kapazität aus den einzelnen Teilkapazitäten der Zellen. Dies hat eine Steigerung der Laufzeit zur Folge. Bei zwei gleichen, parallel verschalteten Zellen verdoppelt sich dementsprechend die Laufzeit.

Die Spannung der gesamten Schaltung bleibt jedoch unverändert. Sie entspricht dem Spannungsniveau einer einzelnen Zelle.

Benötigt man für den Verbraucher zur höheren Kapazität und Stromstärke ebenfalls eine höhere Spannung, kann man zusätzlich auf eine Parallelschaltung zurückgreifen.

Genau wie bei der Reihenschaltung ist auch hier darauf zu achten, nur Zellen des gleichen Typs, Alters und Ladezustands zu verschalten.

7.3 Bezeichnung

Da es in der Regel nicht ersichtlich ist, wie die einzelnen Zellen untereinander verschaltet sind, gibt es, zumindest für LiPo-Akkumulatoren, eine einheitliche Bezeichnungsstruktur.

Zuerst wird die Anzahl der Zellenblöcke in Reihenschaltung angegeben, gefolgt von einem S für Serienschaltung. Anschließend folgt die Zahl der Zellen welche parallel zueinander verschaltet wurden, dieses mal gefolgt von einem P für Parallelschaltung. Abschließend wird die Kapazität in mAh aufgeführt. Dies kann wie folgt aussehen:

3S2P 4000 mAh

Fehlt diese Angabe, was bei fast allen Akkutypen außerhalb des Lithium-Polymer-Bereichs der Fall ist, können mithilfe von Tabelle 3 (siehe S. 19) und den unter 7.1 und 7.2 aufgeführten Formeln leicht alle Kenngrößen der einzelnen Zellen bestimmt werden.

8. Akkuladung

8.1 Grundlagen

Laden ist nicht gleich Laden. Jeder Akku-Typ benötigt ein spezielles Ladeverfahren. Auch sind die präzisen Kenngrößen von unterschiedlicher Wichtigkeit. Einige Akkus können auch einmal leicht überladen werden, ohne an Leistungs- und Funktionstüchtigkeit einzubüßen, andere Typen reagieren hingegen sehr empfindlich auf Überladung.

Nicht jedes Ladegerät beherrscht all die unterschiedlichen Ladeverfahren und nicht jedes Ladegerät erfüllt die notwendige Präzision, um einen Akku schonend zu Laden. Für Lithium-Akkus beispielsweise ist die Einhaltung der Ladeschlussspannung bis auf wenige Millivolt wichtig, um Schäden zu vermeiden.

8.1.1 Ladefaktor und Ladedauer

Ob für die präzise Ermittlung oder nur zum groben Überschlagen der Ladedauer eines Akkus sind drei Größen entscheidend. Zum einen natürlich die Kapazität C eines Akkus (siehe 3.4).

Die zweite entscheidende Größe ist der Ladefaktor κ . Er errechnet sich aus dem Kehrwert des Ladewirkungsgrads.

$$\boxed{\kappa = \frac{1}{\eta}}$$

Gl. 8.1

Der Ladewirkungsgrad berechnet sich wiederum aus dem Quotienten der vom Akku aufgenommenen Ladung bzw. Energie Q_{auf} bzw. E_{Nutz} und der dem Akku zugeführten Ladung bzw. Energie Q_{zu} bzw. E_{zu} . Er liegt beim Aufladen bei ungefähr 70 – 80 %. (SCHULZ, 2014)

$$\boxed{\eta = \frac{Q_{\text{Auf}}}{Q_{\text{Zu}}} = \frac{E_{\text{Nutz}}}{E_{\text{Zu}}}}$$

Gl. 8.2

Welchen Wert der Ladefaktor annimmt hängt vom verwendeten Akku, seinem Zustand und bei manchen Akkutypen auch vom Ladestrom ab. Die Strommenge und

Kapazität beim Laden und Entladen ist beim Lithium-Polymer-Akku nahezu gleich, da hier keine Verluste aufgrund von Nebenreaktionen entstehen. Dies führt dazu, dass Lithium-Akkus einen sehr hohen Ladewirkungsgrad und somit einen geringen Ladefaktor haben.

Akkutyp	Ladefaktor
Blei	1,05 – 1,2
Nickel-Cadmium	1,3 – 1,4
Nickel-Metallhydrid	1,4 – 1,5
Lithium-Polymer	<1,05

Tabelle 5: Ladefaktoren

Mit der letzten Größe, dem Ladestrom I , kann nun mit der folgenden Formel die Ladedauer t ermittelt werden:

$$t = \frac{\kappa * C}{I}$$

Gl. 8.3

mit: t = Ladedauer [h] & κ = Ladefaktor & C = Kapazität [Ah] & I = Strom [A]

8.1.1.1 Beispiel

Gegeben sei folgende Konstellation:

Typ: Lithium-Polymer-Akku

Kapazität: 3000 mAh

Mittelspannung beim Ladevorgang: 3,7 V

Mittelspannung beim Entladevorgang: 3,5 V

Dann Folgt:

Zugeführte Energie:

$$E_{Zu} = U * C = 3,7 V * 3000 mAh = 11100 mWh$$

Aufgenommene/Nutzbare Energie:

$$E_{Nutz} = U * C = 3,5 V * 3000 mAh = 10500 mWh$$

Wirkungsgrad:

$$\eta = \frac{E_{\text{Nutz}}}{E_{\text{Zu}}} = \frac{10500 \text{ mAh}}{11100 \text{ mAh}} = 94,6\%$$

Ladefaktor:

$$\kappa = \frac{1}{0,946} = 1,06$$

Einmal angenommen, man würde den Lithium-Polymer-Akku mit konstanter Spannung laden, was in der Praxis nicht funktionieren würde (siehe 7.2.1), dann würde bei einer gängigen Laderate von 1 C und einem vollständig entladene Akku sich die Ladedauer wie folgt berechnen:

$$t = \frac{\kappa * C}{I} = \frac{1,06 * 3000 \text{ mAh}}{3000 \text{ mA}} = 1 \text{ h } 4 \text{ min}$$

In der Regel sind LiPo-Akkumulatoren nie komplett entladen (Storage-Spannung), oder werden bis zum Maximum geladen, sodass bei einer Laderate von 1 C erfahrungsgemäß der Akku in 20 – 40 min auf seine gewünschte Spannung bzw. Kapazität gebracht werden kann.

8.2 Ladearten

Man unterscheidet in der Praxis zwischen vielen verschiedenen Ladeverfahren. Nicht jede Ladeart ist für jeden Akkutypen geeignet oder sinnvoll. Manche dürfen sogar unter keinen Umständen auf einen speziellen Akkutypen angewandt werden, da es sonst zu Schäden oder gar zur Zerstörung des Akkus, unter Umständen auch zur Explosion, kommen kann. Um einen Überblick darüber zu erhalten, welches Ladeverfahren für den vorliegenden Akku am besten geeignet ist, sollen im Folgenden die gängigsten Ladearten aufgezeigt werden.

8.2.1 Konstantstromladung (CC)

Die wohl älteste Variante des Akkuladens ist das Konstantstromladen, auch CC-Verfahren (CC = Constant Current) genannt. Wie der Name dieses Verfahrens ver-

muten lässt, bleibt der Strom über die gesamte Ladedauer konstant. Dies hat zur Folge, dass mit zunehmendem Ladezustand des Akkus die Ladespannung ansteigt.

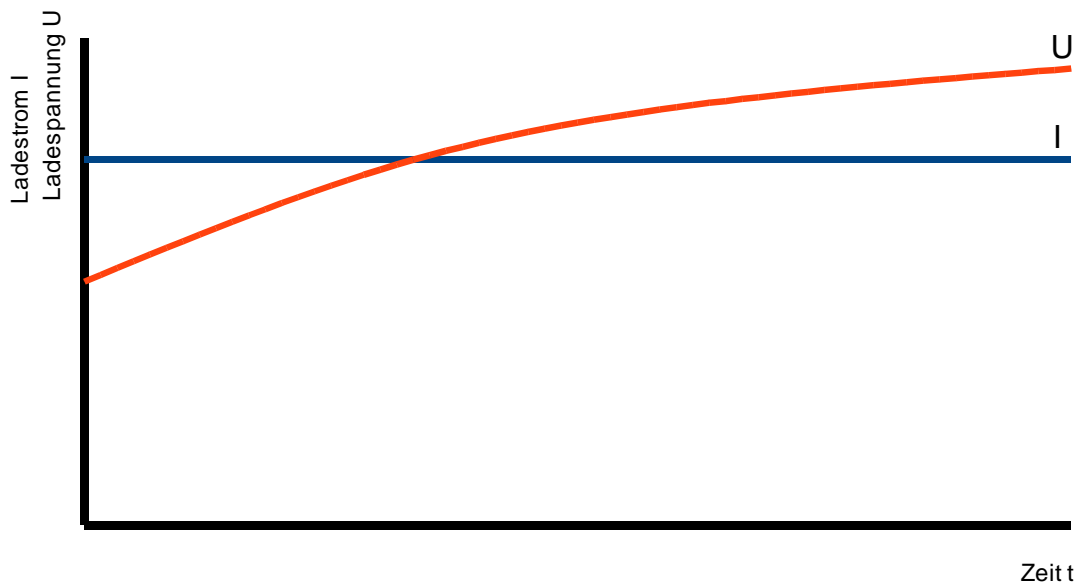


Abbildung 16: Konstantstromladung

Der Ladevorgang endet erst, wenn eine vorher eingestellte Zeit verstrichen ist. Dies hat mehrere Nachteile. Zum einen, besteht stets die Gefahr der Überladung des Akkus, falls dieser nicht voll entladen war, oder die Ladezeit falsch berechnet wurde. Für Nickel-Cadmium-Akkus ist dies vernachlässigbar, da diese nicht besonders empfindlich auf Überladung reagieren, sofern der Ladestrom nicht zu groß ist.

Zum anderen kann nur ein geringer Ladestrom angelegt werden, da sonst die Überladungsgefahr extrem zunimmt. In der Regel wird dieses Verfahren mit für Laderaten um $0,1\text{ C}$ angewandt. Dies entspricht für NiCd-Akkumulatoren einer Ladedauer von 14 Stunden. (SCHULZ, 2014)

Keinesfalls angewendet werden darf diese Methode für Nickel-Metallhydrid- und Lithium-Akkus. Da diese Akkutypen mitunter sehr empfindlich auf Überladung reagieren. Bei Akkus auf Lithium-Basis kann dies sogar zu Akkubränden bis hin zur Explosion des Akkus führen.

8.2.1.1 Konstantstromladung Spannungskontrolle

Um eine bessere Rückmeldung vom Akkumulator zu erhalten, führt man bei der Konstantstromladung eine Spannungskontrolle durch. Man spricht bei dieser Art des Ladens auch von Pulsladung, da der Strom regelmäßig unterbrochen wird und somit eine pulsierende Ladung stattfindet.

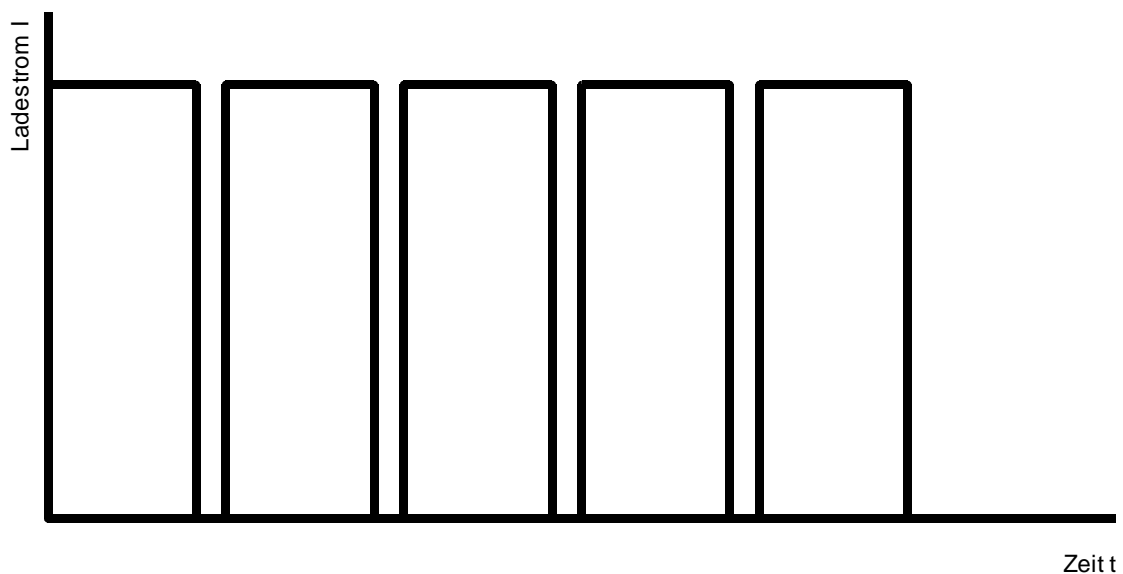


Abbildung 17: Konstantstromladung mit Stromunterbrechung

Im Prinzip funktioniert dieses Ladeverfahren genau wie das normale Konstantstromladen, mit dem Unterschied, dass in regelmäßigen Abständen die Spannung des Akkus gemessen wird. Um den Schaltungsaufwand und die Messfehler gering zu halten, wird für die Dauer der Messung der Ladestrom unterbrochen. Dadurch wird eine Verfälschung der Leerlaufspannung vorgebeugt und es ist keine spezielle Messschaltung notwendig, welche wiederum Messfehler aufweisen würde. (SCHULZ, 2014)

Diese Art der Ladung ermöglicht es, Nickel-Cadmium- und Nickel-Metallhydrid-Akkus präzise aufzuladen. Das Ladegerät misst die Leerlaufspannung des Akkus und analysiert diese. Sobald die Spannung nicht weiter steigt, oder wieder beginnt zu sinken, bedeutet dies, dass der Akku vollständig geladen ist und das Ladegeräte stoppt den Ladevorgang.

Für Akkus auf Lithium-Basis ist auch diese Art des Ladens nicht geeignet. Würde man dennoch versuchen, einen Lithium-Akku mit Konstantstrom zu laden, würde er mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit nicht einmal den ersten Ladeversuch überleben. (SCHULZ 2014)

8.2.2 Konstantspannungsladen

Das Konstantspannungsladen ähnelt dem Konstantstromladen, mit dem Unterschied, dass nun anstelle des Stroms, die Spannung konstant gehalten wird. Damit der Ladestrom zu Beginn des Ladens nicht zu groß wird, wird er meist über einen Widerstand im Ladegerät geführt. Würde man auf diesen Widerstand verzichten, käme es aufgrund der hohen Spannungsdifferenz zwischen leerem Akku und anliegender Ladespannung zu sehr hohen Strömen, welche den Akku beschädigen würden.

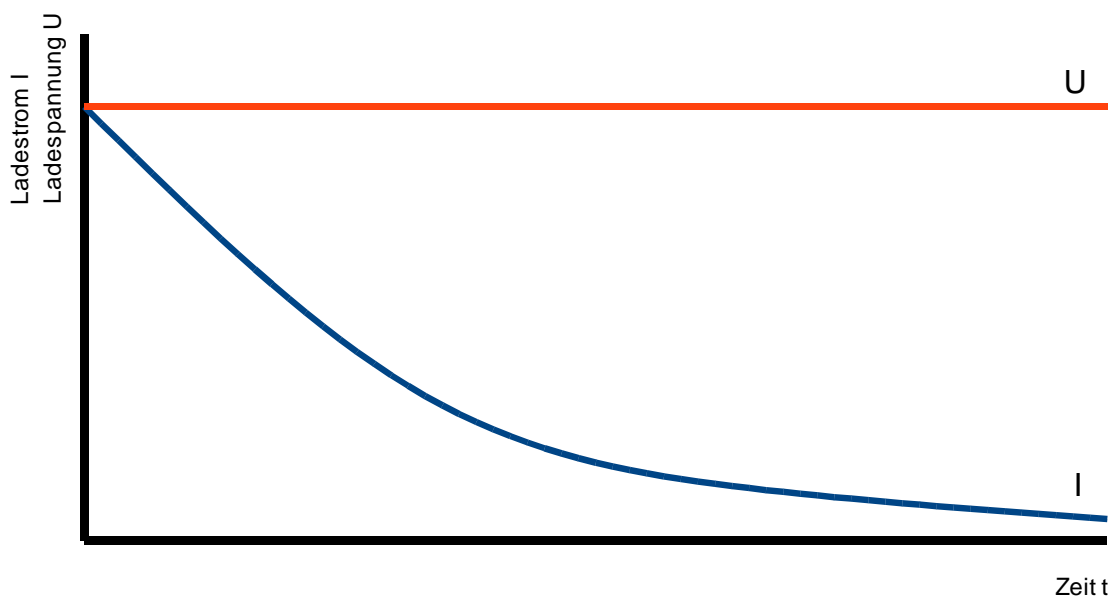


Abbildung 18: Konstantspannungsladen

Mit dem Widerstand legt folglich die angelegte Ladespannung den Anfangsladestrom fest. Mit fortschreitendem Ladezustand des Akkus sinkt der Ladestrom immer weiter ab.

Dieses Ladeverfahren ist besonders für Lithium- oder Blei-Akkus gut geeignet, da mit der anliegenden Ladespannung die empfohlene Ladeschlussspannung für den Akkutyp präzise eingehalten werden kann. So wird eine Überladung des Akkus verhindert.

Für Akkus auf Nickel-Basis ist diese Lademethode jedoch wenig sinnvoll, da die Spannung bei ihnen keinerlei Rückschlüsse auf den Ladezustand zulassen. Bei NiCd- und NiMH-Akkus hängen diese nämlich von vielen Unterschiedlichen Faktoren, wie beispielsweise dem Alter des Akkus oder dem Ladestrom ab. (SCHULZ, 2014)

8.2.3 Reflexladen

Eine Weiterentwicklung des Pulsladens ist das Reflexladen. Bei ihr wird zusätzlich kurz vor der Spannungsmessung ein hoher, kurzzeitiger Entladestrom generiert.

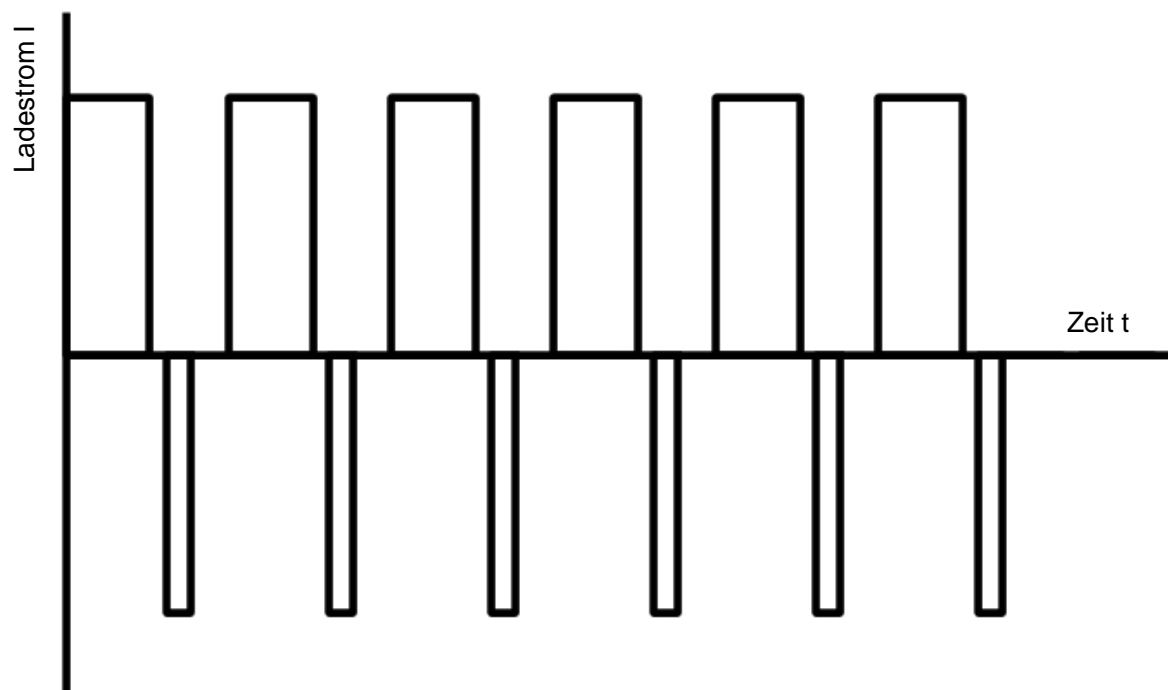


Abbildung 19: Reflexladung

Durch diesen Entladeimpuls wird die, bei hohen Ladeströmen, unerwünschte Sauerstoffansammlung an der Kathode verhindert. Dies ermöglicht es Akkus deutlich

schneller zu laden und verhindert weiterhin einen Anstieg des Innenwiderstands beim Laden, was zu einer geringeren Erwärmung der einzelnen Zellen führt. Da diese Methode darüber hinaus den Memory- bzw. den Lazy-Effekt (siehe 4.3) unterbinden, wird dieses Ladeverfahren gern zum Laden von NiCd- und NiMH-Akkumulatoren genutzt. (SCHULZ 2014)

8.2.4 IU-Laden

Eine Kombination aus Konstantstrom- und Konstantspannungsladeverfahren ist das sogenannte IU-Verfahren. „I“ steht hier für Strom und „U“ für Spannung. Im englischen Sprachgebrauch spricht man auch vom CCCV-Verfahren, für „constant current constant voltage“. Zu Ladebeginn wird mit einer konstanten Stromstärke geladen (vgl. 7.2.1). Der Vorteil hierbei ist, dass so die Gefahr einer Beschädigung des Akkus durch zu hohe Ladeströme zu Beginn des Ladevorgangs vermieden wird.

Während des Ladevorgangs steigt die Spannung stetig an. Sobald die Ladeschlussspannung für den geladenen Akkumulatortyp erreicht ist, schaltet das Ladegerät auf Konstantspannungsladen um (vgl. 7.2.2). Hierdurch wird sichergestellt, dass der Akku nicht durch zu hohe Ladespannung beschädigt wird.

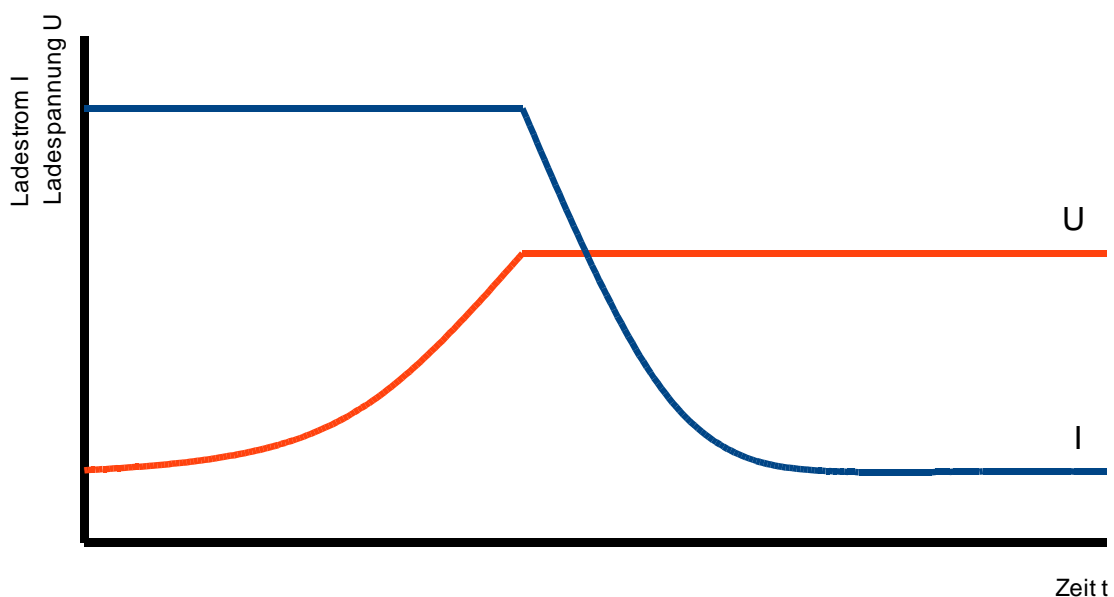


Abbildung 20: CCCV-Ladeverfahren

Durch diese Art der Ladung kann ein Akku sehr schnell geladen werden, da die Vorteile beider Ladeverfahren effizient genutzt werden. Beim Übergang von Konstantstrom- zu Konstantspannungsladen ist der Akku bereits zu 70 – 80 % geladen. (SCHULZ, 2014)

Dieses Ladeverfahren kommt vorrangig für Lithium-Akkus zum Einsatz, da bei ihnen ein einhalten der Ladeschlussspannung bis auf wenige Millivolt sehr wichtig ist. Der Ladevorgang wird vom Ladegerät beendet, sobald der Ladestrom einen gewissen Grenzwert unterschreitet.

9. Zusammenfassung

Ziel dieser Bachelorarbeit war es, einen kompakten und leicht verständlichen Überblick über den derzeitigen Stand der Technik im Bereich der Akkutechnologie zu vermitteln. Aufgezeigt werden sollten die verschiedenen Akku-Technologien, ihre Besonderheiten sowie verschiedene Verfahren zur Ladung von Akkumulatoren. Auch ein fundiertes Fachwissen mit allgemeinem Bezug auf Batterien und Akkus sollten dem Leser vermittelt werden.

Beschränkt wurde sich hier auf die Technologien, welche primär dem Zweck dienen, Drohnen und Flugmodelle zu betreiben. Akkumulatoren und Batterien, welche zwar sehr gebräuchlich sind, im genannten Aufgabenbereich jedoch keinerlei Verwendung finden, wurden lediglich für einzelne Beispiele, Vergleiche und Berechnungen aufgeführt.

Das fundierte Wissen, aus dem diese Bachelorarbeit entstand, wurde durch sehr aktuelle Fachliteratur erschlossen. Dies ist unumgänglich, da die Eigenschaften von Akkus sich mit zunehmendem Technologiefortschritt immer schneller ändern.

Gezeigt wurde, was die einzelnen Akkumulatoren ausmacht, welche Vorteile welche Technologie bietet und worauf bei der Verwendung eines bestimmten Akkutypen unbedingt geachtet werden muss. Auch sollte nachvollziehbar aufgezeigt werden, wie die Entwicklung von Akkumulatoren sich abzeichnet. Hierbei ist wichtig, dass die Entwicklung im Bereich der Akkus in den letzten Jahren große Fortschritte gemacht hat. Des Weiteren sollte diese Arbeit ein Gefühl für die Entwicklungstendenz für die Zukunft geben, ohne sich speziell festzulegen.

Abschließend lässt die Analyse der einzelnen Akku-Technologien, auch nach anerkannter Fachmeinung, nur den folgenden Schluss zu: Nickel-Cadmium-Akkumulatoren sind praktisch nicht mehr existent, da allein schon auf Grund ihres Verbots durch das „Batteriegesetz“ das Schicksal dieser Technologie besiegelt ist. Ebenfalls ist der Nickel-Metallhydrid-Akku für den Einsatz im Flugmodell nicht mehr zeitgemäß, da die Energiedichte anderer Technologien eindeutig besser ist. Anwendung finden Sonderformen des NiMH-Akkus im Flugbereich dennoch, bei-

spielsweise für die Stromversorgung von Sendern.

Die Anwendungshoheit für den elektrischen Antrieb von Flugmodellen gehört derzeit ganz klar dem Lithium-Polymer-Akku. Er ist zwar lediglich eine Weiterentwicklung des Lithium-Ionen-Akkus, zeichnet sich aber durch seine gute Hochstromfähigkeit und der damit einhergehenden guten Leistungsabgabe aus. Die in den letzten Jahren anlaufende Massenproduktion für diese Akku-Technologie führte zu einem regelrechten Preissturz. Diese herausragende Kombination von geringen Kosten und Leistung wird dafür sorgen, dass auch in naher Zukunft Elektromotoren und Bordnetze von Drohnen und Flugmodellen mit Lithium-Polymer-Akkumulatoren gespeist werden.

10. Literaturverzeichnis

KURZWEIL P. & SCHEIPERS P., 2012:

Chemie: Grundlagen, Aufbauwissen, Anwendung und Experimente. Vieweg + Treubner Verlag, 9. Auflage.

LINDEN D. & REDDY T., 2002:

Handbook of Batteries. The McGraw-Hill Companies, 3rd Edition.

PASSERN U., 2013:

Das LiPo-Buch: Grundlagen und Praxistipps. Verlag für Technik und Handwerk neue Medien, 1. Auflage.

RETZBACH L., 2014:

Akkus und Ladegeräte: Das Standardwerk für Hobby und Modellbau. GeraMond Verlag, 15. Auflage.

SCHULZ D., 2014:

Akkus und Ladetechniken: Das Praxisbuch für alle Akku-Typen, Ladegeräte und Ladeverfahren. Franzis Verlag.

SCHWABE I. & GRUBER F., 1997:

Batterien und Ladekonzepte: Begleittexte zum Entwicklerforum. Royal Media Print, 10. Auflage.

TRUEB L. F. & RÜETSCHI P., 1998:

Batterien und Akkumulatoren: Mobile Energiequellen für heute und morgen. Springer Verlag.

11. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schema der Voltasche Säule.....	6
Abbildung 2: Gruppen der galvanische Zellen.....	9
Abbildung 3: Verbraucher, Akku und Laderegulung in einem Gerät	11
Abbildung 4: Schema einer Galvanische Zelle.....	13
Abbildung 5: Selbstentladung eines NiCd-Akkus.....	15
Abbildung 6: Innenwiderstand eines Akkumulators.....	20
Abbildung 7: Spannungsverlauf eines NiCd-Akkus.....	24
Abbildung 8: Gegenüberstellung der Entladekurve.....	28
Abbildung 9: Memory-Effekt.....	29
Abbildung 10: Lazy-Effekt.....	30
Abbildung 11: Funktionsprinzip eines Lithium-Ionen-Akkus.....	32
Abbildung 12: Aufbau einer Lithium-Polymer-Zelle.....	36
Abbildung 13: Hochleistungs-LiPo-Akku mit 260 Wh/kg.....	37
Abbildung 14: Prinzip einer Serienschaltung.....	41
Abbildung 15: Prinzip einer Parallelschaltung.....	43
Abbildung 16: Konstantstromladung.....	48
Abbildung 17: Konstantstromladung mit Stromunterbrechung.....	49
Abbildung 18: Konstantspannungsladen.....	50
Abbildung 19: Reflexladung.....	51
Abbildung 20: CCCV-Ladeverfahren.....	52

12. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Bezeichnungen von Batterie- und Akkubauformen.....	14
Tabelle 2: Selbstentladung bei verschiedenen Akkutypen.....	16
Tabelle 3: Nennspannung von Batterien und Akkumulatoren.....	19
Tabelle 4: Gegenüberstellung verschiedener Akkutechnologien.....	40
Tabelle 5: Ladefaktoren.....	46