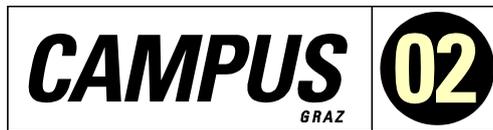


Masterarbeit

**ENERGIEMANAGEMENT VON, MITTELS
ENERGIESPEICHERN BETRIEBENEN, MOBILEN
TRANSPORTEINHEITEN IN DER LAGERLOGISTIK**

ausgeführt am



FACHHOCHSCHULE DER WIRTSCHAFT

Fachhochschul-Masterstudiengang
Automatisierungstechnik-Wirtschaft

von

BSc Thomas Hammer

1610322019

betreut und begutachtet von
DI Dr. techn. Manfred Pauritsch

Graz, im November 2017

.....
Unterschrift

EHRENWÖRTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre ehrenwörtlich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die angegebenen Quellen nicht benützt und die benutzten Quellen wörtlich zitiert sowie inhaltlich entnommene Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

.....
Unterschrift

DANKSAGUNG

Diese Zeilen möchte ich all jenen widmen, die mir während der Erstellung dieser Arbeit zur Seite gestanden sind und mich unterstützt haben.

Vorrangig ist es mir ein Anliegen meine Familie zuerst zu erwähnen, wobei ich ganz besonders meine Freundin Birgit Hochstrasser und meine Tochter Valerie hervorheben möchte, die mich einerseits immer wieder motiviert haben, andererseits aber vor allem den notwendigen Freiraum und die erforderliche Zeit gegeben haben, um mich auf meine Masterarbeit und das Studium konzentrieren zu können.

Ein Dank gilt dem Hause KNAPP AG, und dort im Speziellen meinem Vorgesetzten Herrn Dipl. Ing. (FH) Johannes Hutter, Herrn Ing. Alfred Gindl und Herrn Dipl. Ing. Christian Koppensteiner.

Zu guter Letzt möchte ich selbstverständlich meinen Betreuer Hrn. DI Dr. techn. Manfred Pauritsch erwähnen, der durch seine Unterstützung ebenso einen Beitrag am Erfolg dieser Arbeit hat.

KURZFASSUNG

Der Inhalt dieser wissenschaftlichen Arbeit beschäftigt sich mit der Erarbeitung möglicher, kabelloser Energieversorgungskonzepte für bewegliche Transportsysteme in der modernen Lagerlogistik.

Weil durch die stetig zunehmende Anlagengröße und Komplexität der Aufwand durch herkömmliche Stromversorgung Komponenten und Bereiche effizient, sicher und kostenoptimiert zu versorgen, permanent zunimmt, wird geprüft, ob und welche Energiespeicher hier als Alternative in Frage kommen. Es gibt konkrete Anwendungsfälle wo man aus bereits installierten und in Betrieb befindlichen Anlagen ein gewisses Muster betreffend Verfügbarkeit, Stillstand und Energiebedarf ermitteln kann. Diese Daten haben letztendlich auch auf die Entscheidungsfindung einen maßgeblichen Einfluss.

Im theoretischen Teil dieser Arbeit werden marktgängige und aus heutiger Sicht ausgereifte Energiespeichervarianten hinterleuchtet. Es werden dabei diverse Akkumulator-Technologien und der Doppelschichtkondensator miteinander verglichen um letztendlich einen Überblick der Stärken, Schwächen und Risiken zu schaffen. Ein wichtiges Kriterium ist mit Sicherheit die Lebenserwartung des jeweiligen Speichermediums, weil in KNAPP Anlagen Wartungs- und Austauscharbeiten einen nicht unwesentlichen Kostenfaktor einnehmen.

Im Praxisteil wird dann anhand von existierenden Anlagen sowie einem Testaufbau herausgefunden, welches Speichersystem (Spezifikation der Technologie und der erforderlichen Kapazität) sich am besten zu eignen scheint und unter welchen Kriterien (dazu zählen beispielsweise Durchsatz, Verfügbarkeit, Stillstand der Anlage) eine Umsetzung der Versorgung mittels Energiespeicherung nicht mehr sinnvoll realisiert werden kann und somit ausscheidet.

ABSTRACT

Due to the fact that applications of mobile transport units in warehouse systems are permanently growing and becoming more complex, the expenditure of installing conventional power supply equipment, such as cables and rails, are increasing, too. It is already difficult to find safe, efficient and cost optimized solutions. Bearing that fact in mind, KNAPP AG development got encouraged to investigate the possibility of using wireless solutions by installing modern energy storing devices.

In order to be able to find a suitable technology and to decide on essential requests the data of already existing installations were considered. Characteristic values influencing decision-making are energy requirements, the ratio of working time and standstill, as well as the capacity of the warehouse systems.

The theoretical part of this paper deals with the investigation of several different possibilities of energy storage systems but restricted on state of the art solutions. Technologies which are still undergoing development carry a risk which KNAPP AG is not willing to take. In the end an overview of strengths, weaknesses and safety issues is presented helping to assess which technologies seem to meet the requirements of KNAPP AG. Particular attention is given to an estimated total lifetime capacity and permissible number of charging processes, as they are essential criteria for maintenance.

Afterwards, according to typical requirements of KNAPP AG systems, the goal is subsequently to determine the break-even point of a technology taking into account the before mentioned key requirements. The findings of this thesis should elaborate on the question where using storage systems instead of conventional power supply seems to be appropriate or not. Finally, the feasibility and consequences of the implementation of wireless power supply systems are examined based on already existing projects.

INHALTSVERZEICHNIS

1	Einleitung.....	1
1.1	Das Unternehmen KNAPP AG	1
1.2	Die Ist-Situation.....	2
1.3	Die Aufgabenstellung.....	2
1.3.1	Das OSR Shuttle™	3
1.3.2	Der OSR Lift.....	4
1.3.3	Hauptziele dieser Arbeit.....	5
1.3.4	Nebenziele dieser Arbeit.....	5
2	Energiespeicherung	6
2.1	Formen der Energiespeicherung	6
2.2	Allgemeines zu Batterie und Akkumulator	9
2.2.1	Die Entwicklung von Batterie und Akkumulator	9
2.2.2	Begriffserklärung gemäß Literatur	12
2.2.3	Aufbau einer Zelle.....	12
2.3	Allgemeines zum Kondensator	14
2.3.1	Die Entwicklung des Kondensators	14
2.3.2	Der Superkondensator.....	15
3	Relevante Begrifflichkeiten und Kennwerte von elektrochemischen Speichern	17
3.1	Der C-Wert beziehungsweise die C-Rate.....	17
3.2	Die Entladetiefe.....	18
3.3	Die Zyklenzahl	19
3.4	Energie- und Leistungsdichte	19
3.5	Der Innenwiderstand.....	19
3.6	Selbstentladung und Temperatureinfluss	20
3.7	Relevante elektrochemische Gesetze	20
3.7.1	Das arrheniussche Gesetz	21
3.7.2	Das faradaysche Gesetz	22
4	Ladephasen und Ladeverfahren	23
4.1	Ladephasen	23
4.2	Ladeverfahren.....	24
4.2.1	Laden mit konstantem Strom (CC-Ladung).....	24
4.2.1.1	Das Pulsladeverfahren	25
4.2.1.2	Das Reflexladeverfahren	25
4.2.2	Laden mit konstanter Spannung (CP-Ladung).....	25
4.2.3	Laden mit konstantem Strom und konstanter Spannung (CC-CV-Ladung).....	26
4.2.3.1	Laden mit konstantem Strom und unterschiedlichen, konstanten Spannungen	27
4.2.3.2	Laden mit unterschiedlichen, konstanten Strömen und konstanter Spannung	27
4.2.4	Das Widerstandsladeverfahren	28
5	Der Bleiakкумулятор	29

5.1.1	Laden von Bleiakkumulatoren	30
5.1.1.1	Der Memory Effekt.....	31
5.1.2	Entladung von Bleiakkumulatoren	31
5.1.2.1	Die Entladekurve eines Bleiakkumulators	31
5.1.2.2	Einfluss des Entladestroms auf die Ladungsmenge	32
5.1.3	Selbstentladung des Bleiakkumulators.....	34
5.1.4	Optimaler Betrieb und Nachhaltigkeit.....	35
5.1.5	Sicherheitshinweise beim Umgang mit Bleiakkumulatoren	35
6	Lithiumsysteme	36
6.1	Verbreitete Lithiumionensysteme	36
6.1.1	Der Lithiumion-Kobalt-Akkumulator (Li-Ion)	37
6.1.2	Der Lithiumion-Mangan-Akkumulator (Li-Mn).....	37
6.1.3	Der Lithium-Eisenphosphat-Akkumulator (LFP).....	38
6.1.4	Der Lithium-Titanat-Akkumulator (LTO)	38
6.1.5	Die Super Charge Ion Battery (SCiB).....	39
6.1.6	Der Lithium-Sulfat-Akkumulator (LSP)	40
6.1.7	Der Lithium-Schwefel-Akkumulator (Li-S)	40
6.1.8	Der Lithium-Luft-Akkumulator	41
6.1.9	Der Lithium-Polymer-Akkumulator (LiPo)	41
6.2	Laden von Lithiumionensystemen	43
6.3	Entladen von Lithiumsystemen.....	44
6.4	Sicherheit und Handhabung von Lithiumionensystemen	44
6.5	Nachhaltigkeit und Kosten	45
6.5.1	Balancing von Zellen	46
6.5.2	Kosten und Marktentwicklung.....	47
6.5.3	Nachhaltigkeit von Lithiumsystemen	47
7	Der Doppelschichtkondensator	48
7.1	Aufbau des Doppelschichtkondensators	50
7.1.1	Ersatzschaltbild und elektrisches Verhalten	51
7.1.1.1	Einfluss der Spannung auf die Kapazität	51
7.1.1.2	Temperatureinfluss auf die Kapazität.....	52
7.2	Lebensdauer und Alterung	53
7.3	Sicherheit, Nachhaltigkeit, Kosten	53
8	SWOT Analyse.....	55
9	Anforderungen an KNAPP AG Systeme	56
9.1	Anforderungen und Umgebungsbedingungen.....	56
9.1.1	Behälterdurchsatz	56
9.1.2	Temperatur und Luftfeuchtigkeit.....	56
9.1.3	Schichtmodell und Verfügbarkeit.....	56
9.1.4	Abmessungen und Zusatzmasse	57
9.2	Bewertung der Energiespeicher unter Berücksichtigung der Anforderungen	57
10	Details zum OSR Shuttle™	59

10.1	Das OSR Shuttle™ Doppelspiel	59
10.2	Messungen und Daten aus bestehenden Anlagen.....	60
10.3	Erhebung des Energiebedarfs	62
10.3.1	Messungen im Testraum	62
10.3.1.1	Testkonfiguration für Antriebe	62
10.3.1.2	Das Load-Store-Verfahren	63
10.3.1.3	Das beladene OSR Shuttle™	64
10.3.1.4	Das nicht beladene OSR Shuttle™	65
10.3.1.5	Gesamtbewertung eines Doppelspiels, Zyklenzahl	66
10.3.2	Energiebedarf des OSR Shuttle™	66
10.4	Ausführung mit Doppelschichtkondensatoren	67
10.4.1	Ermittlung der verfügbaren und erforderlichen Kapazität	67
10.4.2	Zyklenzahl und Durchsatz	69
10.4.2.1	Lade- und Entladezyklen	69
10.4.2.2	Optimierungsmöglichkeiten und Anregungen	70
10.5	Ausführung mit einem Lithiumionensystem	71
10.5.1	Dimensionierungsansatz	71
10.5.2	Auslegung des Akkumulators	71
10.5.2.1	Grundanforderungen und technische Daten	71
10.5.2.2	Korrekturen wegen Akkumulator-Spezifikationen	72
10.6	Ausführung mit einem Hybridsystem	73
10.7	Zusätzliche Aufgabenstellung bei Einsatz eines Energiespeichers am OSR Shuttle™	75
10.7.1	Prozess- und Systemfehler.....	75
10.7.1.1	Sleep-Modus	76
10.7.1.2	Rettungsshuttle und Parkbereich	76
10.7.2	Sicherheitsabschaltung im Not-Halt Fall und bei Gassenbegehungen	76
10.7.2.1	Safety-Level.....	77
10.8	Resümee und Vorschau für den Anwendungsfall am OSR Shuttle™	77
11	Details zum OSR Lift.....	79
11.1.1	Das OSR Lift Doppelspiel	79
11.1.2	Zyklenzahl und Durchsatz	79
11.2	Erhebung des Energiebedarfs	81
11.2.1	Messung im Stillstand	82
11.2.2	Messung mit 50 kg Last – Beschleunigung	83
11.2.3	Messung mit 50 kg Last – Bremsen	84
11.2.4	Energiebedarf eines Doppelspiels	84
11.3	Ausführung mit Doppelschichtkondensatoren	85
11.4	Ausführungen mit einem Lithiumionensystem	86
11.5	Ausführungen mit einem Hybridsystem	86
11.6	Zusätzliche Aufgabenstellung bei Einsatz eines Energiespeichers auf der Liftplattform	87
11.6.1	Prozess- und Systemfehler.....	87
11.6.2	Sicherheitsabschaltung im Not-Halt Fall und bei Begehungen	88

11.6.2.1 Safety-Level.....	88
11.7 Resümee und Vorschau für den Anwendungsfall auf der Liftplattform	88
Literaturverzeichnis	90
Abbildungsverzeichnis.....	91
Tabellenverzeichnis.....	94

1 EINLEITUNG

1.1 Das Unternehmen KNAPP AG

Der Inhalt dieser Masterarbeit ist für das Unternehmen KNAPP AG sowohl aus technischer Sicht, als auch wirtschaftlich von Bedeutung. Einleitend eine kurze Vorstellung des Unternehmens.



Abbildung 1: KNAPP AG Logo, Quelle KNAPP AG (Hrsg.).

KNAPP AG (<https://www.knapp.com>) zählt mit einem Jahresumsatz von mehr als 650 Millionen Euro und seinen über 35 Standorten weltweit sicher zu einem Global Player und einem der Spitzenreiter im Bereich der Intralogistiklösungen. Die Exportrate liegt derzeit bei 97 %. Das Unternehmen setzt auf einen Personalstand von etwa 3200 Mitarbeitern und konnte bereits mehr als 1700 Anlagen seit Firmenbestehen in Betrieb nehmen.¹

Unter anderem durch den hohen Innovationsgrad und der damit Hand in Hand gehenden Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten kann und will KNAPP AG ein zuverlässiger Lieferant von Systemlösungen, die die neuesten Technologien berücksichtigen, sein. Eines dieser zu überdenkenden und zugleich herausfordernden Themen befasst sich mit der Prüfung und Weiterentwicklung diverser Energieversorgungsmöglichkeiten von fahrbaren beziehungsweise sich bewegenden Transporteinheiten in der Intralogistik. Hier sind in unserem Alltag bereits ganz eindeutige Akzente gesetzt worden, die Möglichkeiten von Verbesserung des Nutzungsgrades und damit gleichzeitig auch Fortschritte bezüglich Ressourcenschonung durch Einsatz von elektrischen Energiespeichern vorantreiben.

Die Tatsache, dass man sich im Hause KNAPP durch den Einsatz geeigneter Lösungen auf der einen Seite eine Kostenersparnis, auf der anderen aber auch eine Vereinfachung bei Montage und Inbetriebnahme erhofft, zählt genauso zu den Beweggründen hier rechtzeitig aktiv zu werden und sich mit dem Thema auseinander zu setzen, wie die Tatsache, dass Nachhaltigkeit und Umweltverträglichkeit zukünftig eine immer größer werdende Rolle spielen werden. Das Haushalten und optimale Ausnutzen der vorhandenen Ressourcen ist zur Zukunftssicherung unserer und nachfolgender Generationen unumgänglich.

Das Bestreben einer Weiterentwicklung des bestehenden Energieversorgungskonzeptes stellt die Motivation und den Grund der Entstehung dieser Arbeit dar.

¹ KNAPP AG (2017), Online-Quelle [28.04.2017].

1.2 Die Ist-Situation

Im Produktportfolio der Firma KNAPP AG und zugleich als fixer Bestandteil in modernen Intralogistikzentren spielen, unter anderem, bewegliche Transporteinheiten eine wesentliche Rolle. Diese werden benötigt um unterschiedlichstes Fördergut in vertikaler und horizontaler Richtung dem Auftragsfenster entsprechend zu manipulieren. Weil KNAPP AG hierfür auf elektrifizierte Lösungen setzt, müssen sämtliche Komponenten, die dafür erforderlich sind die auf den Transporteinheiten montierten Sensoren, Aktoren, Steuerungen und Antriebe mit Energie zu versorgen, entsprechend beweglich verlegt werden, beziehungsweise über andere Lösungen, wie zum Beispiel mittels Schleifkontakten, realisiert werden. Diese Art der Versorgung ist einerseits recht kostspielig, zugleich auch speziell im Fall der Schleifkontaktlösung, mit hohen Wartungsaufwänden verbunden. Zudem werden die Anlagen immer größer im Sinne der Distanzen die je Fahrt zurückzulegen sind.

Zugleich sollten die Produkte aber an Kompaktheit gewinnen, was zum Beispiel bei zu beachtenden Biegeradien von Schleppketten und Kabeln für Schwierigkeiten sorgt. Außerdem werden die Anforderungen an die Bewegungsfahrten als solche auch immer komplexer. Daraus resultieren oft mit sehr viel Aufwand verbundene Lösungen Installationsmöglichkeiten zu finden, Kabelwege vernünftig vorzusehen und nebenbei diese Anlagenteile im Gesamtkonzept auch noch in vernünftige Bereiche und Stromkreise zu gliedern, stellt eine immer größer werdende Herausforderung dar.

1.3 Die Aufgabenstellung

Vorrangig sollen derzeit zwei Produkte speziell auf eine mögliche Weiterentwicklung und die damit zu erwartende Verbesserung untersucht werden. Einerseits ist das Energiekonzept des OSR Shuttle™ zu überdenken, andererseits auch jenes des Behälterlifts. Beide Produkte sind im Logistikprozess direkt aneinander gebunden und arbeiten immer in einem übergeordneten System, dem *Order Storage and Retrieval System* – kurz OSR – zusammen. Hierbei handelt es sich um ein automatisches Regalsystem, welches in Länge und Höhe variabel gestaltet werden kann und somit auch eine, durch die mechanische Dimension begrenzte, Anzahl an Behältern einlagern kann. Die Länge beträgt zum heutigen Zeitpunkt bis zu 200 m. Die Höhe wiederum wird über die Anzahl der Ebenen definiert. Diese Ebenenanzahl kann 60 Ebenen umfassen, was zu einer Gesamthöhe des Systems von etwa 18 m führen würde. Prognosen zufolge ist davon auszugehen zukünftig wesentlich höhere Regale zu installieren. Das Kollektiv aus Ebenenanzahl und Länge bilden letztendlich eine OSR-Gasse. Es ist durchaus üblich mehrere Gassen in einem Lager zu installieren. Die Gesamtkonfiguration hängt unter anderem von der Art des Lagerguts, dem Layout und dem gewünschten Durchsatz ab.

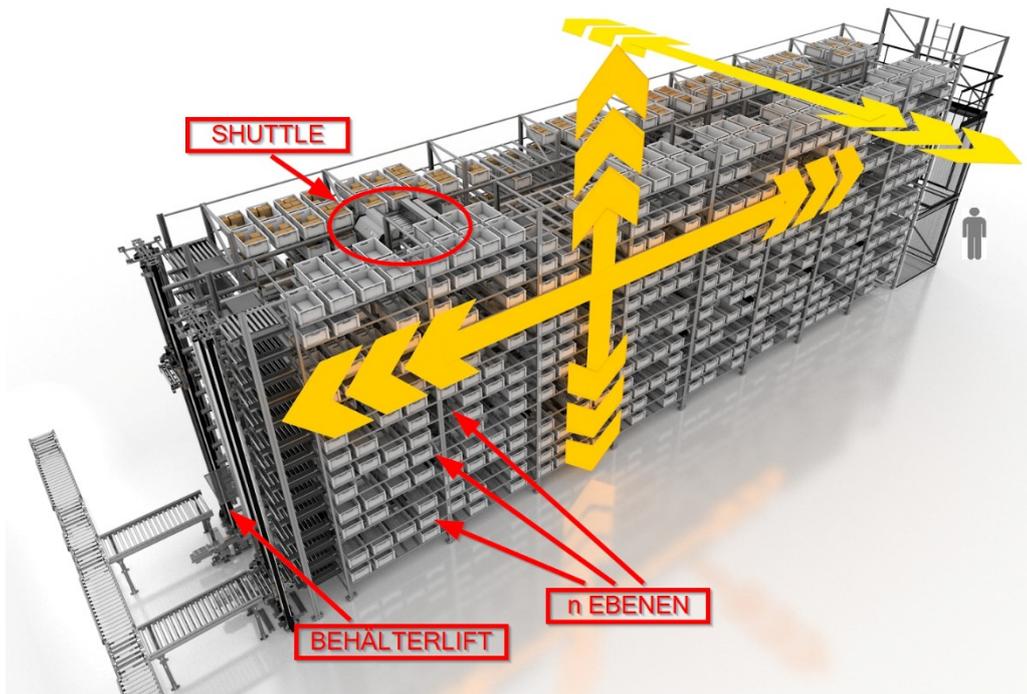


Abbildung 2: Systemübersicht OSR Gasse, Quelle: KNAPP AG (Hrsg.).

1.3.1 Das OSR Shuttle™

Beim OSR Shuttle™ handelt es sich um ein in horizontaler Richtung selbstfahrendes Ebenenbediengerät, welches Behältnisse unterschiedlicher Größen und unterschiedlicher Massen in ein Regal ein- und auslagert. Es bewegt sich je nach Ausführung mit einer Geschwindigkeit von bis zu 4 m/s. Aktuell ist es nicht möglich mit einem OSR Shuttle™ mehrere Ebenen zu bedienen, was zur Folge hat, dass es je Ebene ein OSR Shuttle™ geben muss. Via Software wird dem OSR Shuttle™ mitgeteilt, welcher Behälter an welchem Platz in der Ebene eingelagert oder ausgelagert werden soll. Dieser wird dann am Ende der Gasse je nach Auftrag am Behälterlift entgegengenommen oder abgegeben.

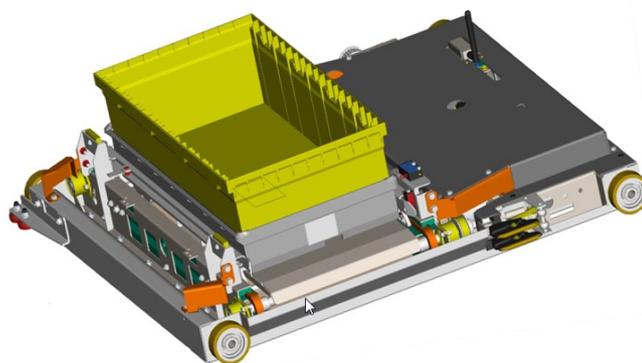


Abbildung 3: Systemübersicht OSR Shuttle, Quelle: KNAPP AG (Hrsg.).

Die Auftragssteuerung erfolgt über eine OnBoard Steuerung. Die Hardware für diese Steuerung, die erforderlichen Antriebe und ein Teleskop, welches für die Ein- und Auslagerung erforderlich ist, werden über eine ebenso am OSR Shuttle™ befindliche SuperCap-Schaltung mit der erforderlichen Energie versorgt. Diese SuperCap-Schaltung wiederum wird mittels Schleifkontakten an einem

Stromschienensystem permanent gespeist und geladen. In jeder Ebene, in der sich das OSR Shuttle™ bewegen soll, ist es zwangsläufig notwendig Stromschienen zu installieren um die Energieversorgung (24 VDC beziehungsweise 48 VDC) zu gewährleisten. Bei einer Gassenlänge von bis zu 200 m und an die 60 Ebenen ist der damit verbundene Material-, Installations- und Kostenaufwand beträchtlich.

1.3.2 Der OSR Lift

Hierbei handelt es sich um ein System, welches die einzelnen Ebenen des OSR in vertikaler Richtung miteinander verbindet und die Behälter entweder an die Fördertechnik, oder an das OSR Shuttle™ abgibt beziehungsweise aufnimmt. Die Höhe hängt vom OSR ab und liegt bei aktuellen Anlagen im Bereich von bis zu 18 m. Die Geschwindigkeit mit welcher der Lift derzeit bewegt werden kann beträgt 7 m/s.

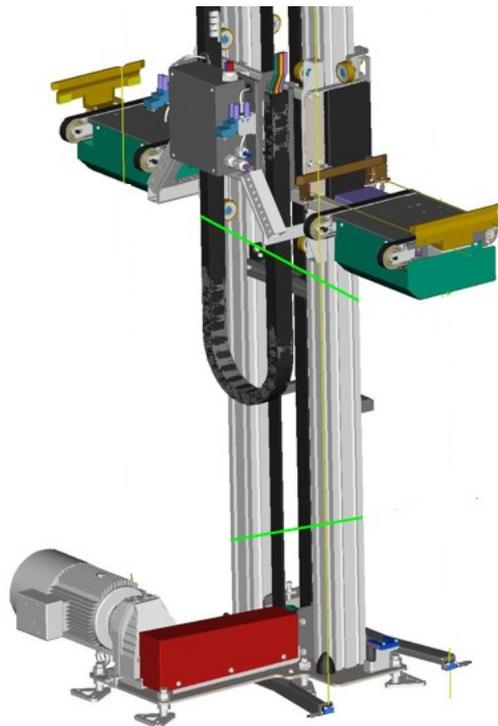


Abbildung 4: Systemübersicht OSR Lift, Quelle: KNAPP AG (Hrsg.).

Mit dem Lift ist es möglich Behälter aus einer definierten Übergabestelle in jede beliebige Ebene zu befördern, beziehungsweise selbstverständlich auch umgekehrt aus jeder Ebene zur Übergabestelle zu befördern. Das Fördergut wird mit Motorrollen bewegt. Diverse Sensoren sind auf dem Lastaufnahmemittel montiert um unter anderem Position von Behälter, aber auch Lage des Lastaufnahmemittels in Bezug auf das angrenzende Regal zu erkennen. Die Energieversorgung für diese Komponenten wird derzeit über eine Schleppkette realisiert, welche besonders bei zunehmender Anlagenhöhe und großer Geschwindigkeit für Schwierigkeiten sorgt.

Wenn man bedenkt, dass dieser Lift alle Ebenen und somit alle in einer Gasse verfügbaren OSR Shuttle™ bedienen muss, kann man sich recht gut vorstellen, dass hier das Verhältnis von Stillstandszeit zur bewegten Phase sehr gering ist und der Lift während des Betriebes nur beim Behältertausch stillstehen wird.

1.3.3 Hauptziele dieser Arbeit

Es soll im Zuge dieser wissenschaftlichen Arbeit untersucht werden, ob es für definierte KNAPP AG Systeme Möglichkeiten gibt, anstelle der konventionellen, verkabelten beziehungsweise verschienten Energieversorgung auf eine Alternative in Form eines kompakten Energiespeichers zu setzen. Dass es unzählige Formen der Energiespeicherung gibt, ist hinlänglich bekannt. Jedoch gilt es zu prüfen, ob es auch unter Berücksichtigung der KNAPP AG spezifischen Anforderungen geeignete Technologien gibt. Diese Technologie muss den Kundenanforderungen bezüglich Verfügbarkeit der zu transportierenden Produkte gerecht werden. Das bedeutet: Lagertopologie und -strategie spielen eine wesentliche Rolle bei der Technologieauswahl, weil dadurch die Stillstandszeit und, daraus resultierend, das Lademanagement bestimmt werden. Weitere Parameter und Fragen, die für die Lösungsfindung zu beachten sind, wären unter anderem:

- Wo liegt die Anzahl der prognostizierten Ladezyklen gemäß den Herstellerangaben?
- Wie wirken sich Teilentladungen auf die Lebensdauer aus?
- Wie ist das Ladeverhalten definiert? Wie darf geladen werden und worauf ist dabei zu achten?
- Kann die Technologie bei den herrschenden Umgebungsbedingungen sachgemäß betrieben werden?
- Welche Risiken bringt die jeweilige Technologie mit sich?
- Wie wirkt sich die Technologie auf Mechanik aus? Welcher Gewichtszuwachs und welche Kubatur sind zusätzlich für den Energiespeicher vorzusehen?
- WICHTIG: Die Lösung muss universell, zumindest produktspezifisch, einsetzbar sein. Es ist nicht im Sinne der Standardisierung jeden Anwendungsfall mit individuellen Speicherkonzepten umzusetzen.

Als Ergebnis der Arbeit soll unter Berücksichtigung der zuvor erwähnten Aspekte festgestellt werden, ob sich nach heutigem Stand der Technik Superkondensatoren, Akkumulatoren oder eine hybride Lösung bestehend aus beiden Technologien am besten für KNAPP AG Anwendungen eignet.

Die Tatsache, dass es auch zu Anlagen- und Prozessfehlern kommen kann, die einen unvorhersehbaren Stillstand der Transporteinheit zur Folge haben, der sich wiederum negativ auf die Verfügbarkeit auswirken kann, darf nicht unberücksichtigt bleiben.

Es sollen bevorzugt nur Lösungen untersucht werden, die sich bereits am Markt etabliert haben und wo man von Technologien spricht, die bekannterweise funktionieren. Deswegen werden als zu prüfende Technologien Akkumulatoren und Superkondensatoren betrachtet.

1.3.4 Nebenziele dieser Arbeit

Eine zusätzliche Herausforderung stellt im Fall einer Energieversorgung mittels Energiespeicherung und der damit in Verbindung stehenden Trennung vom permanenten Netz, der Zugriff auf den Antrieb im Not-Halt und Fehlerfall dar. Es stellt sich die Frage welche Anforderungen an die Sicherheitsschaltung gestellt werden, um das geforderte Performance Level für die Personensicherheit und Maschinensicherheit zu erreichen. Diese Anforderungen sollen erhoben, jedoch im Zuge dieser Arbeit nicht detailliert betrachtet werden. Es sollen nur Ideen und Möglichkeiten eingebracht werden.

2 ENERGIESPEICHERUNG

2.1 Formen der Energiespeicherung

Heutzutage ist der Verzicht auf Energiespeicherung für die meisten Menschen unvorstellbar und würde den Alltag vieler Zivilisationen enorm erschweren, man kann durchaus soweit gehen und behaupten, dass dieser Verzicht das teilweise Erliegen vieler als selbstverständlich erachteter Systembestandteile zur Folge hätte. Genau diese Bedeutung und Wichtigkeit sprechen dafür, einen kurzen Einblick in die Entstehungsgeschichte zu gewähren.

Energie kann nicht erzeugt, sondern nur umgewandelt werden. Das bedeutet zugleich Energie wird demnach nie vernichtet. Es entsteht bei jeder (Re)Aktion nur eine andere Form von Energie, welche dann für den gewünschten Anwendungsfall eventuell nicht weiter nutzbar ist und deswegen als verlorene beziehungsweise vernichtete Energie betrachtet wird.

	Mechanische Energie	Thermische Energie	Lichtenergie	Elektrische Energie	Chemische Energie
Mechanische Energie	Getriebe, Kolbenpumpe, Wasserturbine, Windkonverter	Reibungswärme, Wärmepumpe, Kühlschrank, Verdichter	Tribolumineszenz	Generator, Mikrofon, Piezoeffekt	technisch ungelöst
Thermische Energie	Dampf- und Gasturbine	Wärmetauscher, Absorptionskältemaschine	Glühlampe, Wärmestrahler	SEEBECK-Effekt, thermoionische Diode, magneto-hydrodynamischer Generator	endotherme Reaktion
Lichtenergie	Radiometer, Strahlungsdruck	Lichtabsorption, Solarkollektor, Kernspaltung	Fluoreszenz, Lichtleiter	Fotozelle, Nuklidbatterie	Fotosynthese, Fotolyse
Elektrische Energie	Elektromotor, Elektroosmose, Elektromagnet	PELTIER-Effekt, THOMSON-Effekt, Elektroheizung	Leuchtstoffröhre, Spektrallampe, Radiosender	Transformator	Elektrolyse, Elektrodialyse, Akkumulator
Chemische Energie	Osmose, Muskel	exotherme Reaktion, Verbrennung	Chemolumineszenz, Leuchtkäfer	Batterie, Brennstoffzelle	chemische Reaktion

Abbildung 5: Übersicht diverser Energieumwandlungen nach Eduard W. L. Justi, Quelle: Kurzweil/Dietlmeier (2015), S. 6 (leicht modifiziert).

Schlussfolgernd bedeutet das vereinfacht gesagt weiter, dass Energie in unterschiedlicher Form in den unterschiedlichsten Medien schon gespeichert ist und nur noch der Quelle in gewünschter Form zu entziehen und umzuwandeln ist.

Man unterscheidet zwischen fünf Arten der Energie:²

- Mechanische Energie
- Elektrodynamische Energie
- Thermodynamische Energie
- Bindungsenergie
- Feldenergie

Nachfolgende Abbildung veranschaulicht, vereinfacht dargestellt, von welchen Leistungs- und Energiedimensionen in Abhängigkeit des einsetzbaren Zeitbereiches man heute spricht und welche Technologie für den jeweiligen Fall passend erscheinen. Bei der Auswahl von Energiespeichern, sofern es der Bedarfsfall überhaupt ermöglicht auszuwählen, sollten zusätzlich Faktoren wie Wirkungsgrade, Lebensdauer und Reifegrad, neben den damit Hand in Hand gehenden Auswirkungen auf die Umwelt, berücksichtigt werden. Auch hier weisen die angeführten Technologien stark unterschiedliche Stärken und Schwächen auf, die gegebenenfalls abzuwägen sind.

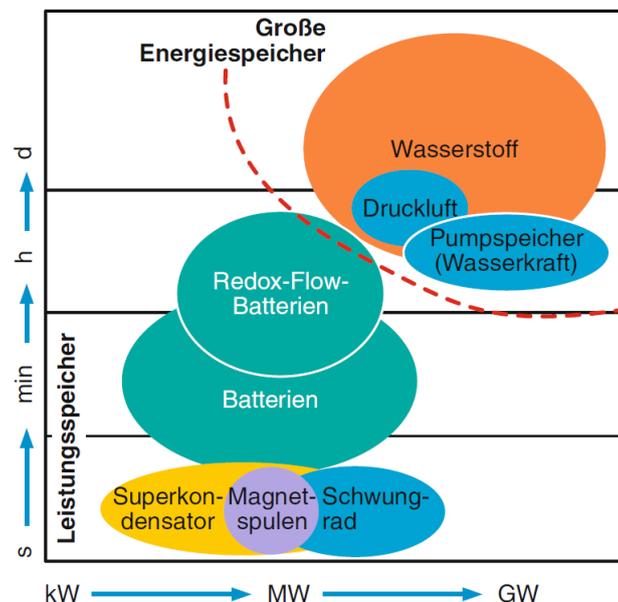


Abbildung 6: Übersicht von Zeitbereich/Leistung/Energiedichte diverser Energiespeicher, Quelle: Kurzweil/Dietlmeier (2015), S. 3.

Zusätzlich relevant sind neben der Energiedichte auch Parameter wie Selbstentladung, Entladetiefe und die typische Speicherdauer, für welche die einzelnen Systeme angedacht sind und eingesetzt werden, sowie die zu erwartende Zyklenzahl.

² Vgl. Kurzweil/Dietlmeier (2015), S. 6.

	Energie- dichte Wh L ⁻¹	Leistungs- dichte kW L ⁻¹	Wirkungs- grad (%)	Selbstent- ladung (% je Tag)	Entlade- tiefe (%)	Ansprech- zeit (s)	Typische Speicher- dauer	Relative Kosten je kWh
Pumpspeicher	0,27 (100 m) 1,5 (550 m)	–	75–82	0,005– 0,02	80–100	≈ 180	h ... d	sehr günstig
Druckluft	2 (70 bar) 6 (200 bar)	–	42–54	0,5–1	35–50	< 600	h ... d	moderat
Wasserstoff	140 (50 bar)	–	–	–	–	–	h ... d	günstig
Schwungrad	80–200	< 10	80–95	50–100	≈ 75	≈ 0,01	s ... h	teuer
Supraleitende Magnetspulen	0,5–10	1–4	80–90	10–15	≈ 100	< 0,01	s ... d	sehr teuer
Super- kondensator	< 10	≈ 10	≈ 99	<< 1	≈ 100	< 0,01	ms ... h	sehr teuer
Lithium- batterie	< 400	≈ 1	≈ 95	0,03	≈ 60	< 1	s ... d	teuer

Abbildung 7: Vergleich von Speichern, Quelle: Kurzweil/Dietlmeier (2015), S. 20.

Für weitere Untersuchungen, um Anwendungen in KNAPP AG Anlagen zu realisieren, werden nur elektrische und elektrochemische Speicher betrachtet. Dazu zählen Kondensatoren, Superkondensatoren, Magnetspulen, Brennstoffzellen und Batterien, wobei sich die genaueren Untersuchungen aber auf Batterien beziehungsweise Akkumulatoren und Superkondensatoren beschränken sollen, weil man mit diesen Technologien durchwegs vertraut ist und auch schon entsprechende Erfahrungswerte in die Nutzung einfließen lassen kann und möchte.

Kondensatoren

„Kondensatoren nutzen Spannungsänderung zur Energiespeicherung.“³

$$W = \frac{CU^2}{2} \quad (2.1)$$

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{d} \quad (2.2)$$

Magnetspulen

„Magnetspulen nutzen Stromänderung zur Energiespeicherung.“⁴

$$W = \frac{LI^2}{2} \quad (2.3)$$

$$L = \frac{\mu_0 \mu_r N^2 A}{l} \quad (2.4)$$

³ Vgl. Kurzweil/Dietlmeier (2015), S.17.

⁴ Vgl. Kurzweil/Dietlmeier (2015), S.18.

Batterien

„Batterien nutzen Änderungen der elektrischen Ladung zur Energiespeicherung.“⁵

$$W = U\Delta Q \quad (2.5)$$

W/J	Energie
C/F	Kapazität
L/H	Induktivität
U/V	Spannung
A/m^2	Elektrodenfläche
d/m	Dicke des Dielektrikums
ϵ_0	elektrische Feldkonstante ($8,8542 \cdot 10^{-12}$ F/m)
ϵ_r	relative Permittivität
I/A	Strom
A/m^2	Querschnitt der Spule
l/m	mittlere Feldlinienlänge
$N/1$	Windungszahl
Q/As	elektrische Ladung
μ_0	Permeabilität ($4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m)
μ_r	Permeabilitätszahl

2.2 Allgemeines zu Batterie und Akkumulator

2.2.1 Die Entwicklung von Batterie und Akkumulator

Die Idee elektrische Energie zu speichern entstand bereits im 18. Jahrhundert und wurde unter anderem von den Herren Alessandro Volta im Fall der Batterie, beziehungsweise Ewald Jürgen im Fall des Kondensators, entwickelt. Herr Volta beschäftigte sich in weiterer Folge auch mit der Weiterentwicklung des Kondensators, weshalb hier vorrangig auf die ihm zugeschriebenen Erkenntnisse eingegangen wird.

Herr Volta entdeckte um 1800, dass es zwischen metallischen Elektroden zu einem kontinuierlichen Stromfluss kommt, wenn diese in einen Elektrolyt getaucht werden. Nach eingehender Untersuchung zahlreicher Metalle stellte sich heraus, dass Elektroden aus Zink, Silber und Kupfer sehr gut geeignet sind. Durch Serienschaltung mehrerer Elektroden, zwischen welche jeweils in ein Elektrolyt getränktes Papier

⁵ Vgl. Kurzweil/Dietlmeier (2015), S.18.

gelegt wurde (*Voltasche Säule*), erkannte er ebenfalls, dass sich diese auf die erzeugte Spannung auswirkt.⁶

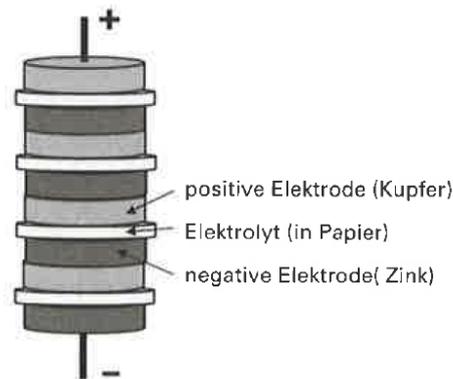


Abbildung 8: Voltasche Säule, Quelle: Jossen/Weydanz (2006), S. 1.

Das Manko an Herrn Volta's Erfindung liegt darin, dass diese nur entladen werden konnte. Mit der Forschung und Entwicklung wieder aufladbarer Batterien setzte sich Herr Johann Wilhelm Ritter auseinander. Seine im Jahr 1802 erfundene Batterie wird als die *Rittersche Säule* bezeichnet.⁷

Als weiterer wegweisender Schritt in der Akkumulator-Entwicklung stellte sich 1833 die Entdeckung von Michael Faraday, dass mit zunehmender Stoffmenge auch die Ladungsmenge zunimmt, heraus. Man bezeichnet diese Zusammengehörigkeit als das *faradaysche Gesetz*, welches zugleich als Geburtsstunde der Elektrochemie angesehen wird.

Weitere Meilensteine in der Weiterentwicklung von Akkumulatoren sind die Entwicklung des Bleiakkumulators im Jahr 1854 (unabhängig voneinander durch Wilhelm Jose Sinsteden und Raymond Louis Gaston Planté), wobei hier die Elektroden aus Bleiplatten gefertigt waren. Diese Form des Akkumulators ist heute noch von Bedeutung und findet nach wie vor vereinzelt in Kraftwerksbatterien Anwendung. 1881 war es durch eine Änderung im Herstellungsprozess, welche von Herrn Camille Alphonse Fauré entwickelt wurde, dann möglich Bleiakkumulatoren in großen Stückzahlen zu fertigen.

Anderen Quellen zufolge war es Herr Georges-Lionel Leclanché im Jahr 1866, dem man durch die Verwendung von Zink und manganoxidbeschichtetem Graphit für die Elektroden, sowie Ammoniumchlorid als Elektrolyt, die Erfindung der massenmarkttauglichen Primärbatterie zuweisen sollte.⁸

Wie es bereits etwa 100 Jahre zuvor Herr Volta tat, befasste sich 1899 Herr Waldemar Junger mit alternativen Materialien für die Elektroden und erfand den Nickel-Cadmium Akkumulator, 1901 folgte Herr Thomas Alva Edison mit der Erfindung des Nickel-Eisen Akkumulators.⁹

⁶ Vgl. Jossen/Weydanz (2006), S. 1.

⁷ Vgl. Jossen/Weydanz (2006), S. 1.

⁸ Vgl. Trueb/Rüetschi (1998), S. 27.

⁹ Vgl. Jossen/Weydanz (2006), S. 1.

Sämtliche zu diesem Zeitpunkt auf dem Markt verbreiteten Technologien wurden mit Wasser wieder befüllt, weil dieses für die Elektrolyse benötigt wurde. Erst 1948 wurde von Herrn Georg Neuman eine wassersparende Lösung patentiert, was zur Markteinführung erster gasdichter Nickel-Cadmium Zellen führte.

Durch die immer weiter zunehmende Anforderung am Markt unzählige mobile Anwendungen mittels Akkumulator zu speisen stieg ebenso rasch wie die Nachfrage auch die Notwendigkeit Lösungen mit höherer Energiedichte zu entwickeln. Der Forschungsdrang führte letztendlich in den frühen 90er Jahren des zwanzigsten Jahrhunderts zur Entwicklung von *Nickelmetallhydridsystemen*, welchen kurze Zeit später die *Lithiumionen-Zelle* folgte.

Alle zuvor beschriebenen Energiespeicher in Form von Batterie und Akkumulator haben ein gemeinsames Funktionsprinzip und bestehen im Wesentlichen aus einem elektrisch-chemischen Wandler, einem chemischen Energiespeicher und einem chemisch-elektrischen Wandler, der die Energie, welche der chemische Speicher abgibt, in elektrische umformt. Es wird lediglich zwischen Primär- und Sekundärzellen beziehungsweise Elementen unterschieden. Sofern ein System nicht wieder aufgeladen werden kann, bezeichnet man es als Primärelement, wieder aufladbare Zellen als Sekundärzellen.¹⁰ Die Gründe dafür, warum Primärzellen nicht wieder aufgeladen werden können liegen unter anderem darin, dass die Kristallgitter beim Entladen zerfallen und sich die Elektroden bei Primärzellen zu verformen beginnen, was im schlimmsten Fall zur Bildung von Dendriten führen kann. Diese können in weiterer Folge Kurzschlüsse verursachen. Für weiterführende Untersuchungen bezüglich Einsatztauglichkeit bei KNAPP AG Anlagen scheiden an dieser Stelle demnach Primärzellen aus.

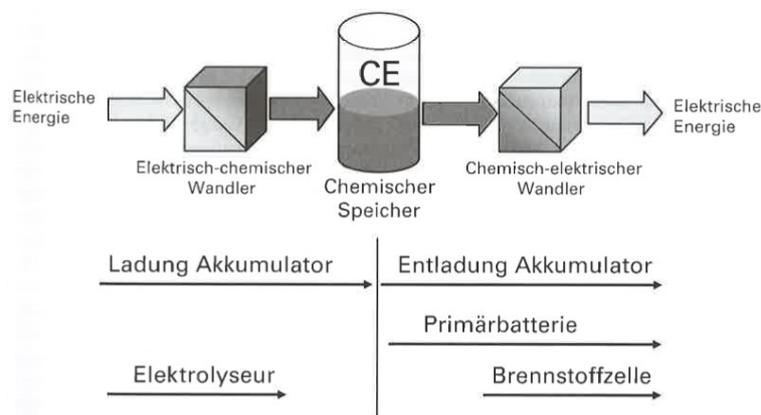


Abbildung 9: Prinzipieller Aufbau eines elektrochemischen Speichers, Quelle: Jossen/Weydanz (2006), S. 5.

¹⁰ Vgl. Jossen/Weydanz (2006), S. 5.

2.2.2 Begriffserklärung gemäß Literatur^{11, 12}

Zelle:

Eine Zelle beschreibt ein galvanisches Element, welches sich aus Elektroden, dem Elektrolyt und dem Leitsalz, sowie eventuell einem Separator zusammensetzt. Bei den Elektroden handelt es sich um chemische Materialien, die Anode und Kathode bilden.

Batterie:

Eine Zusammenführung mehrerer Zellen beschreibt eine Batterie. Zusätzlich sind für die Verschaltung der Zellen auch mechanische Komponenten erforderlich. Man spricht hierbei auch von Primärzellen.

Akkumulator:

Dabei handelt es sich ebenfalls um eine Verschaltung mehrerer Zellen, jedoch im Vergleich zur herkömmlichen sind diese wieder aufladbar – sogenannte Sekundärsysteme.

2.2.3 Aufbau einer Zelle

Eine Zelle besteht im Wesentlichen aus zwei Elektroden, welche im Fall der Entladung als *Kathode (positive Elektrode)* und *Anode (negative Elektrode)* bezeichnet werden. Beim Ladevorgang wechselt diese Polarität, es hängt somit vom Betriebszustand der Zelle ab, welche Elektrode die positive und welche die negative ist. Beide werden jeweils aus einem anderen Material hergestellt und in eine leitende Flüssigkeit, dem sogenannten Elektrolyt, getaucht. Die Materialwahl ist unter anderem für die erzeugbare Spannung relevant. Um diese Spannung zu ermitteln, ist die sogenannte *elektrochemische Spannungsreihe* hilfreich. Diese beschreibt welcher Potenzialunterschied bezugnehmend auf Wasserstoff bei elektrochemischen Reaktionen einzelner Metalle entstehen würde. Zusätzlich kann anhand der Spannungsreihe auch festgestellt werden, wie edel das jeweilige Metall ist – je höher der positive Potenzialunterschied gegenüber Wasserstoff, desto edler ist das Metall. Basierend auf dieser Spannungsreihe lassen sich auch Potenzialunterschiede zweier Metalle erheben.

¹¹ Vgl. Korthauer (Hrsg.) (2013), S. XII.

¹² Vgl. Jossen/Weydanz (2006), S. 6.

Gold	+1,42 V
Platin	+ 1,20 V
Kupfer	+0,34 V
Wasserstoff	±0,00 V
Blei	-0,12 V
Eisen	-0,44 V
Zink	-0,76 V
Magnesium	-2,34 V
Lithium	-3,04 V

Tabelle 1: Auszug der elektrochemischen Spannungsreihe, Quelle: Schulz (2014), S. 12.

In den Elektrolyten getaucht sind Anode und Kathode in der Lage Elektronen, hierbei handelt es sich um negativ geladene Elementarteilchen, auszutauschen. Während im Fall der Entladung an der Anode eine Oxidation stattfindet, kommt es an der Kathode zu einer Reduktion. Dieser Vorgang kehrt sich beim Laden eines Akkumulators um. Wenn ein Atom einen Elektronenüberschuss hat, bezeichnet man es als Kation, bei Elektronenmangel als Anion.¹³ Dieser Strom wird mittels Elektrolyten ermöglicht. Zur Isolierung von Anode und Kathode wird ein Separator zwischen diesen verwendet, welcher so ausgeführt werden muss, dass dieser den Ionenstrom nicht negativ beeinflusst und den Elektrolyten aufnimmt. Zusätzlich wird durch diesen der Abstand zwischen den Elektroden festgelegt und sichergestellt. Die Eigenschaften und das Material des Separators haben zusätzlich auch Einfluss auf die Selbstentladungseigenschaften einer Zelle und somit einer Batterie, beziehungsweise eines Akkumulators.¹⁴ Wenn nun eine Last, ein Verbraucher, angeschlossen wird, kommt es zu einem Abfließen der Kationen von der Anode in Richtung der Kathode, während zeitgleich Anionen von der Kathode zur Anode wandern. Im Fall der Ladung eines Akkumulators verhält sich dieser Prozess genau umgekehrt.

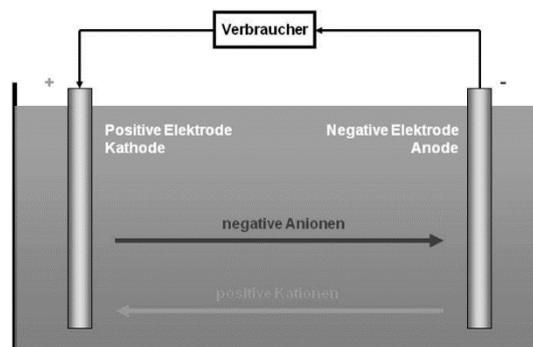


Abbildung 10: Ionenfluss bei Entladen einer Zelle, Quelle: Schulz (2014), S. 14.

¹³ Vgl. Schulz (2014), S. 13.

¹⁴ Vgl. Schulz (2014), S. 15.

Dieser chemische Prozess passiert an der Oberfläche des Materials, weswegen diese Oberfläche von essenzieller Bedeutung ist und so groß wie möglich ausgeführt werden soll. Um das zu erreichen, wird beim Aktivmaterial auf Porosität gesetzt und so eine Oberfläche von mehreren Quadratmetern je Gramm Material erzielt.¹⁵

Zusätzlich ist diese Porosität notwendig um Volumenänderungen, die bei der Entladung auftreten, entgegenzuwirken und die Zyklenzahl zu erhöhen. In weiterer Folge wirkt sich der Aufbau des Aktivmaterials auf die wichtigen Eigenschaften Innenwiderstand und Energiedichte aus.¹⁶

2.3 Allgemeines zum Kondensator

Neben Batterie beziehungsweise Akkumulator ist im Zuge der Tauglichkeitsprüfung auch der Kondensator zu berücksichtigen um eine Entscheidung treffen zu können. Deswegen befassen sich nachfolgende Kapitel mit diesem elektrischen Bauteil.

2.3.1 Die Entwicklung des Kondensators

Wenige Jahre vor der Entwicklung und Erfindung der Batterie wurden im Jahr 1745, unabhängig voneinander, die ersten Formen des Kondensators erfunden. Diese wurden unter den Namen *Kleitsche Flasche*, benannt nach deren Erfinder Herr Ewald Georg von Kleist, und *Leydener Flasche*, benannt nach jener Ortschaft in welcher die beiden Herren Andreas Cunaeus und Pieter van Munschenbroek ihre Form des Kondensators erfanden, benannt.

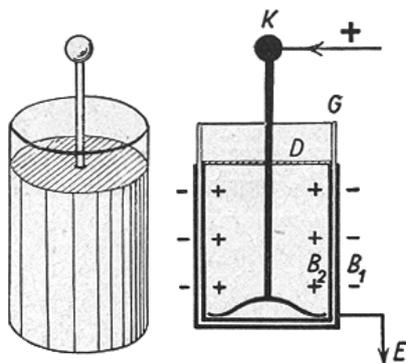


Abbildung 11: Leydner Flasche, Quelle: Uni Ulm (2017), Onlinequelle [07.08.2017].

Bei dieser Form des Kondensators wurde ein Glaszylinder außen und innen mit einer Metallfolie beklebt. Durch Reibung des jeweiligen Isolierstoffes, wie zum Beispiel Bernstein, entstand elektrische Ladung welche im Glasbehälter gespeichert wurde.¹⁷ Die Ladung beziehungsweise Energie wird also bei Kondensatoren im elektrischen Feld, welches sich zwischen den beiden, durch eine isolierende Schicht getrennte, Elektroden bildet, gespeichert. Relevant für die Menge der speicherbaren Ladungsmenge sind

¹⁵ Vgl. Jossen/Weydanz (2006), S. 7.

¹⁶ Vgl. Jossen/Weydanz (2006), S. 8.

¹⁷ Vgl. Liebscher/Held (1968), S. 1.

einerseits die Fläche, andererseits auch die Dicke des Glases, sprich der Isolierschicht zwischen den Elektroden. Zu dieser Erkenntnis kam Herr Benjamin Wilson bereits im Jahr 1746.

In den Folgejahren experimentierten und forschten unzählige Techniker in diesem Gebiet. Es war letztendlich Herr Alessandro Volta, dem durch den Einsatz eines schwefelhaltigen Gummis (Ebonit) als Dielektrikum eine bahnbrechende Weiterentwicklung im Bereich der Kondensatoren gelang.¹⁸

Beinahe 50 Jahre sollten vergehen, ehe Herr Michael Faraday etwa 1830 feststellte, dass zusätzlich auch die Art des Isoliermaterials, des sogenannten *Dielektrikums*, für die Größe der speicherbaren Ladungsmenge von essenzieller Bedeutung ist. Er war es auch, der Dank der Erkenntnis, dass unterschiedliche Materialien unterschiedliche Ladungsmengen ermöglichten und verursachten, in weiterer Folge die ersten Dielektrizitätskonstanten definierte.¹⁹

Es ist jedoch zu beachten, dass sich zwar höhere Dielektrizitätskonstanten positiv auf die Ladungsmenge auswirken, jedoch sind diese oft elektrisch eher von geringer Festigkeit, was sich wiederum unter anderem in Form von sinkender Durchschlagsspannung bemerkbar macht. Zu den verwendeten Dielektrika zählen heute etwa Glas, Glimmer, Keramik, Kunststofffolien, Papier und Luft.

2.3.2 Der Superkondensator

Obwohl vom Aufbau eher einer Batterie zuzuordnen hat sich bei diesen Speichern, den sogenannten Superkondensatoren, der Begriff Kondensator eingepreßt. Wobei hier für die Namensgebung NIPPON ELECTRIC COMPANY verantwortlich ist, weil diese diesen Begriff in den 90er Jahren des 20. Jahrhunderts einführte. Dabei handelt es sich um Doppelschichtkondensatoren, welche einerseits das Speicherprinzip des klassischen Kondensators, andererseits jenes der Batterie nutzen und so Kapazitäten von mehreren tausend Farad ermöglichen. Zu den relevanten Vorteilen zählen vergleichsweise hohe Energiedichte in Bezug auf Kondensatoren und mehr Lade/Entladezyklen als diese mit Batterien erreichbar ist.²⁰

1957 wurde dieser von Herrn H. I. Becker, der damals für General Electric tätig war, patentiert. Teerelektroden in Schwefelsäure bildeten in diesem Fall die Hauptkomponenten des ersten Doppelschichtkondensators. Nachfolgende nennenswerte Weiterentwicklungen gelangen einerseits im Jahr 1966 einem gewissen Herrn R. A. Rightmire, welcher pastöse Elektroden in eine Lösung aus Aluminiumsulfat tauchte. Bis heute wird an der Weiterentwicklung von Doppelschichtkondensatoren gearbeitet. Ihre Einsatzgebiete sind äußerst vielseitig.

¹⁸ Vgl. Kurzweil/Dietlmeier (2015), S. 24.

¹⁹ Vgl. Liebscher/Held (1968), S. 1.

²⁰ Vgl. Kurzweil/Dietlmeier (2015), S. 26.

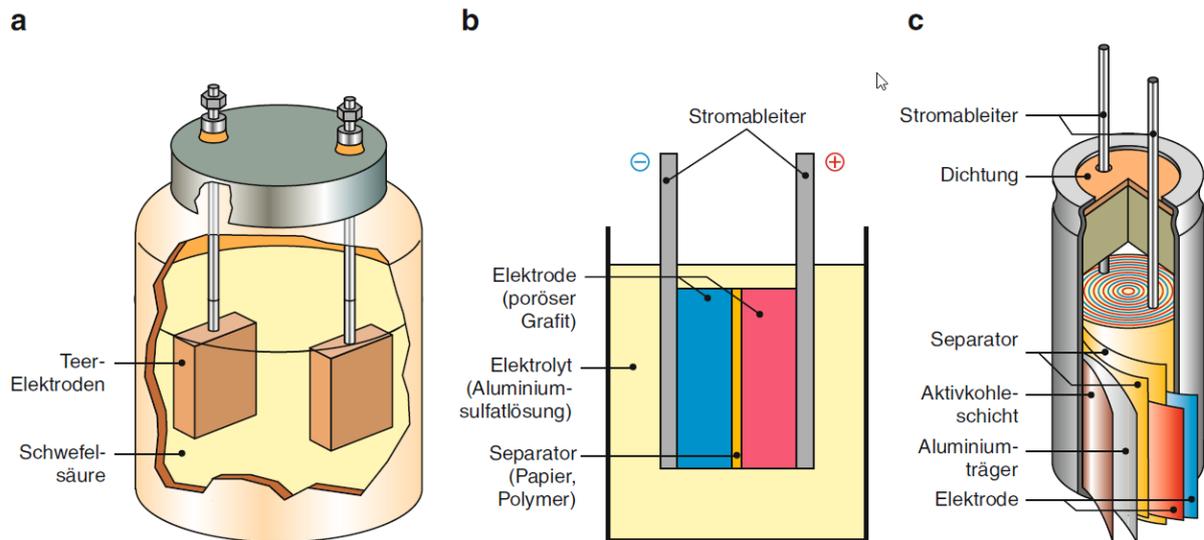


Abbildung 12: Patentierte Doppelschichtkondensatoren: **a.** H. I. Becker (US 2800616), **b.** R. A. Rightmire (US 3288641), **c.** Matsushita (EP 0449145), Quelle: Kurzweil/Dietlmeier (2015), S. 24.

Weil unter anderem auch bereits Anwendungen im Automobilbereich umgesetzt werden, wo Sicherheit, Funktion und Zuverlässigkeit eine große Rollen spielen, handelt es sich hierbei definitiv um eine Technologie die für KNAPP AG Anwendungsfälle zu prüfen ist.

3 RELEVANTE BEGRIFFLICHKEITEN UND KENNWERTE VON ELEKTROCHEMISCHEN SPEICHERN

Die nachfolgenden Kapitel widmen sich den unterschiedlichen Technologien, die zum aktuellen Zeitpunkt in Frage kommen, sowie deren Funktionsweisen und Charakteristiken. Relevant für KNAPP AG Anlagen sind vorrangig:

- Das Lade- und Entladeverhalten;
- Die Selbstentladung;
- Das Temperaturverhalten;
- Welche Faktoren wirken sich direkt auf die zu erwartende Lebensdauer aus, beziehungsweise gibt es Einflussfaktoren, die sich auf die Kapazität/Ladungsmenge unmittelbar im Betrieb, aber auch langfristig betrachtet, auswirken?

Bevor in nachfolgenden Kapiteln auf die einzelnen Technologien eingegangen werden kann, ist es notwendig einige relevante Werte und Begrifflichkeiten etwas genauer zu erläutern, die in weiterer Folge für die Entscheidungsfindung ausschlaggebend sein werden.

3.1 Der C-Wert beziehungsweise die C-Rate

Der C-Wert beziehungsweise die C-Rate beschreibt einen Multiplikator, der aussagt welche Strombelastung für einen Akkumulator bei dessen Lade- und Entladevorgängen zulässig ist. Dabei bezieht sich der Wert auf die Kapazität des Akkumulators in Amperestunden.

Es gilt:

$$C = \frac{I_m}{Q_0} \quad (3.1)$$

I_m/A Lade- beziehungsweise Entladestrom

Q_0/Ah nutzbare Ladung

Anders betrachtet kann man daraus auch ableiten, wie lange ein Akkumulator mit dem maximalen Strom entladen werden kann.

Essenziell für die richtige Interpretation dieses Faktors ist es sich dessen bewusst zu sein, dass man immer von der tatsächlichen Kapazität ausgehen muss, nicht jedoch von der Nennkapazität. Das ist insofern wichtig zu bedenken, weil das schlussfolgernd auch bedeutet, dass sich der höchstzulässige Strom mit der verfügbaren Ladungsmenge verändert. In umgekehrter Konsequenz verändert sich bei konstantem Lade- oder Entladestrom die verfügbare Ladungsmenge als Funktion von diesem Strom. Dieser Zusammenhang wird in der *Peukert-Gleichung* beschrieben, welche sagt:

$$Q = It = Q_0 \left(\frac{I_0}{I} \right)^{k-1} \quad (3.2)$$

I/A tatsächlicher Entladestrom

I_0/A Nennstrom laut Herstellerangaben

$k/1$ Peukert Exponent

Q/Ah verfügbare Ladungsmenge

Q_0/Ah Nennladungsmenge

t/h Zeit

Dass die verfügbare Kapazität mit zunehmendem Entladestrom sinkt, hat mit den Transportvorgängen innerhalb der Elektroden und der Konzentration der OH^- Ionen zu tun.

Neben dem Entladestrom sind noch unter anderem das Alter des Akkumulators, die Temperatur und das Phänomen der Selbstentladung markante Einflussfaktoren, die für die tatsächliche Ladungsmenge ausschlaggebend sind.²¹ Es ist somit immer eine Abweichung von Nennkapazität und tatsächlicher Kapazität zu bedenken.

3.2 Die Entladetiefe

Der Zusammenhang von verbleibender, nutzbarer Ladungsmenge und Nennkapazität wird als Entladetiefe (*DoD – depth of discharge*) bezeichnet.

$$DoD = \frac{Q}{Q_0} \quad (3.3)$$

$DoD/\%$ Entladetiefe

Q/Ah verfügbare Ladungsmenge

Q_0/Ah Nennladungsmenge

Die Verfügbarkeit der vollen Leistung eines Akkumulators variiert bei den einzelnen Technologien zwischen, beispielsweise 80 % DoD einer Lithiumionen Anwendung und nur 50 % bei einem Bleiakkumulator.²²

²¹ Vgl. Jossen/Weydanz (2006), S. 26.

²² Vgl. Kurzweil/Dietmeier (2015), S. 225.

3.3 Die Zyklenzahl

Diese beschreibt, wie oft eine Sekundärzelle wieder aufgeladen werden kann und ist somit eine eindeutige Kennzahl, die die zu erwartende Lebensdauer widerspiegelt. Selbstverständlich hat dieser Wert nur seine Gültigkeit, wenn die geforderten Betriebsbedingungen eingehalten werden. Eine Abweichung von diesen wirkt sich negativ auf die Lebensdauer und somit auf die Zyklenzahl aus.

3.4 Energie- und Leistungsdichte

Zu den wichtigsten Kennzahlen, um für die jeweils benötigte Anwendung die geeignetste Speicherenergie auswählen zu können, zählen sicherlich die Energie- und die Leistungsdichte.

Diese sind dahingehend von Bedeutung, weil sie definieren, welche Energie- und Leistungsmenge pro Gewichtseinheit und Volumeneinheit gespeichert werden kann. Weil sich einerseits die Kompaktheit, andererseits aber auch reduzierte Massen positiv auf jede Form von Einsatz auswirken, ist es somit eine nachvollziehbare Konsequenz und Selbstverständlichkeit, dass in diesem Bereich permanente Forschungsarbeit und ein andauernder Weiterentwicklungsprozess im Gange ist. Für den Einsatz in mobilen Anwendungen, so wie es im Fall der eingangs erläuterten KNAPP AG Systemkomponenten ist, ist selbsterklärender Weise vor allem die Masse zu bedenken, weil diese sich direkt auf den erforderlichen Leistungsbedarf auswirken würde.

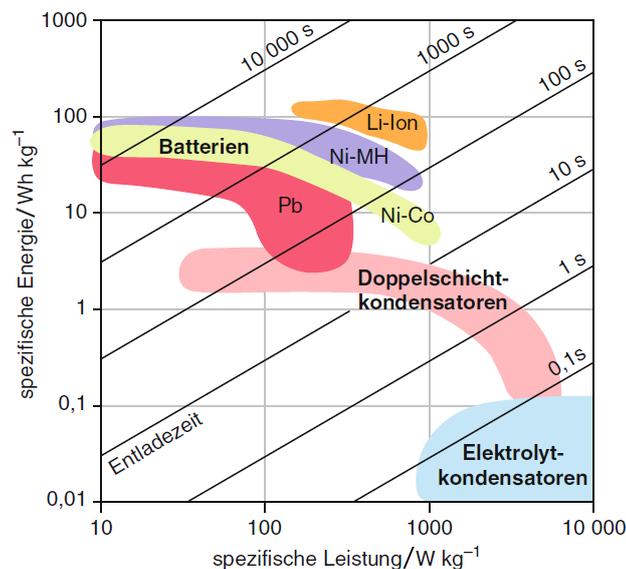


Abbildung 13: Leistungsdaten von Batterien und Kondensatoren, Quelle: Kurzweil/Dietlmeier (2015), S. 27 (leicht modifiziert).

3.5 Der Innenwiderstand

Der Innenwiderstand einer Zelle setzt sich aus den Einzelwiderständen von Kathode, Anode und Elektrolyt zusammen und verändert sich mit der Entladung – er nimmt zu.

$$R_i = R_{Kathode} + R_{Anode} + R_{Elektrolyt} \tag{3.4}$$

$R_{...}/\Omega$ Widerstände

Das ist insofern von Bedeutung, weil eine reale Zelle somit einen Spannungsabfall, den man auch als Überspannung bezeichnet, verursacht. Deswegen kommt es zu einer Abweichung von der theoretischen Gleichgewichtsspannung gemäß der Spannungsreihe und der messbaren Spannung an der Zelle beziehungsweise dem Akkumulator.

$$U = U_0 + \sum_i \eta_i \quad (3.5)$$

U/V	Polspannung
U_0/V	Gleichgewichtsspannung
η_i/V	Überspannungen

Abbildung 14 soll dies veranschaulichen.

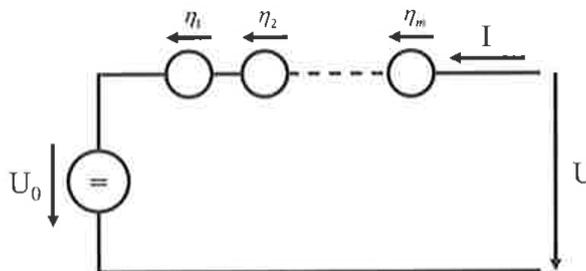


Abbildung 14: Ersatzschaltbild elektrochemischer Zelle(n), Quelle: Jossen/Weydanz (2006), S. 16.

Der Innenwiderstand ist zugleich verantwortlich für die Höhe der Aktivierungsenergie, die notwendig ist um die elektrochemischen Reaktionen in einer Zelle auszulösen.

3.6 Selbstentladung und Temperatureinfluss

Zum Phänomen der Selbstentladung kommt es durch elektrochemische Prozesse, die sogar bei unbelasteten, leerlaufenden und zum Beispiel nur gelagerten Akkumulatoren stattfinden. Die Konsequenz ist eine Abnahme der gespeicherten Ladung. Besonders die Temperatur ist ein Faktor, der massiven Einfluss auf den Grad der Selbstentladung hat. Aus diesem Grund ist die vorgeschriebene Lagerungstemperatur laut Herstellerangaben unbedingt einzuhalten um diesen Faktor möglichst gering zu halten. Es ist aber nicht hilfreich die Temperatur zu niedrig zu halten um der Selbstentladung entgegenzuwirken, weil zugleich die verfügbare Ladungsmenge mit steigender Temperatur zunimmt. Deswegen gelten für die meisten Systeme, dass die Temperatur zwischen 20 °C und 40 °C für den optimalen Nutzen gehalten werden sollte.²³

3.7 Relevante elektrochemische Gesetze

Zusätzlich zu der bereits in Kapitel 2.2.3 erläuterten elektrochemischen Spannungsreihe sind für die Funktionsweise von Akkumulatoren und anderen elektrochemischen Speichern noch zumindest die beiden nachfolgenden Gesetze von großer Bedeutung.

²³ Vgl. Reddy (Hrsg.) (2014), S.3.9.

3.7.1 Das arrheniussche Gesetz

Die Leistungsfähigkeit elektrochemischer Systeme und deren Alterung und Selbstentladungsgrad hängen stark von der elektrochemischen Reaktionsgeschwindigkeit ab. Nimmt diese Geschwindigkeit zu, steigt auch die Leistungsfähigkeit, zugleich aber hat diese eine negative Auswirkung auf Alterung und Selbstentladung. Die Reaktionsgeschwindigkeit ist stark von der absoluten Temperatur abhängig, was das *arrheniussche Gesetz* wie folgt beschreibt:

$$k = k_0 e^{\left(\frac{E_A}{RT}\right)} \quad (3.6)$$

$k/M^{-1}s^{-1}$	Reaktionsgeschwindigkeitskonstante
$k_0/1$	Frequenzfaktor
$E_A/Jmol^{-1}$	Aktivierungsenergie
$R/JK^{-1}mol^{-1}$	universelle Gaskonstante (8,314 JK ⁻¹ mol ⁻¹)
T/K	absolute Temperatur

Daraus lässt sich als Richtwert ableiten, dass eine Temperatursteigerung von 10 K bereits eine Verdoppelung der Reaktionsgeschwindigkeit verursacht²⁴, zugleich steigt auch der prozentuelle Selbstentladungsgrad im selben Verhältnis.

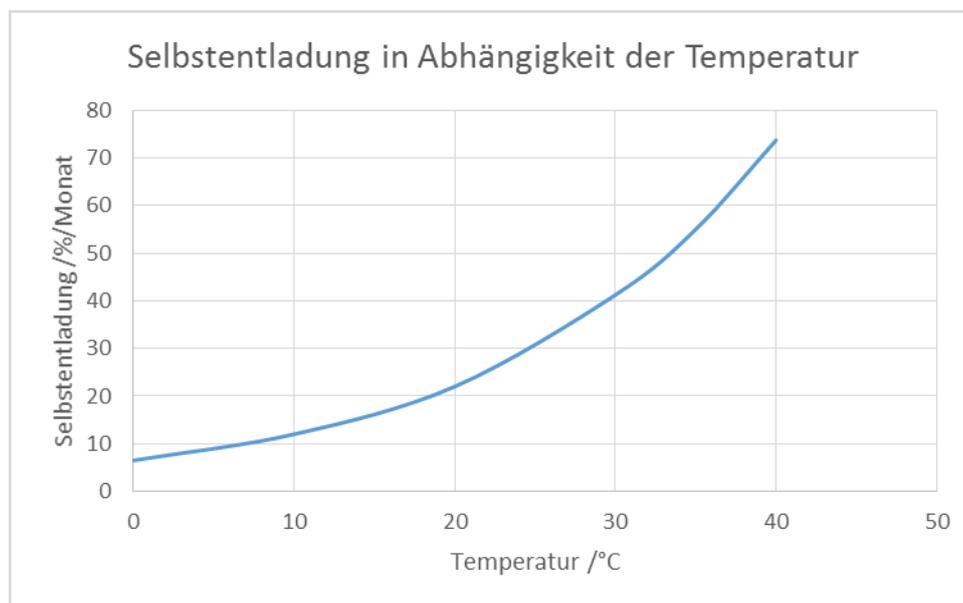


Abbildung 15: Selbstentladung in Abhängigkeit der Temperatur, Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Werte von Jossen/Weydanz (2006), S. 21.

²⁴ Vgl. Jossen/Weydanz (2006), S. 21.

3.7.2 Das faradaysche Gesetz

Das faradaysche Gesetz beschreibt den Zusammenhang von der jeweiligen Stoffmenge und der elektrischen Ladung und lautet:

$$Q = nzF \tag{3.7}$$

Q/As	elektrische Ladung
n/mol	Stoffmenge
$z/1$	Anzahl der ausgetauschten Elektronen
F/Asmol^{-1}	faradaysche Konstante (96487 Asmol^{-1})

Die Anzahl der austauschbaren Valenzelektronen hängt vom jeweils gewählten Material ab. In der Praxis lässt sich somit einfach ermitteln, welche chemische Masse erforderlich ist, um eine gewünschte Ladungsmenge speichern zu können.

4 LADEPHASEN UND LADEVERFAHREN

Um die unterschiedlichen Akkumulatoren nicht durch eine falsche Vorgehensweise beim Wiederaufladen zu beschädigen, beziehungsweise die Lebensdauer unnötigerweise zu verkürzen, ist zu beachten, dass es unterschiedliche Ladephasen und Ladeverfahren gibt, die sich nicht uneingeschränkt für jeden Speicher einsetzen lassen.

Es gibt einfache Ladeverfahren und etwas komplexere, bei welchen entsprechende Managementsysteme die Regelung der Lade- und Entladevorgänge übernehmen. Dabei werden aus Parametern wie Strom, Spannung und Temperatur Erkenntnisse über den Akkumulator-Zustand abgeleitet. Diese Regelung hat unter anderem die Aufgaben Überladung, Tiefentladung und Übertemperatur zu vermeiden.

Relevant für den Ladevorgang sind Ladestrom und Ladespannung, sowie der *Ladefaktor* des jeweiligen Akkumulators. Dabei handelt es sich um den Kehrwert des Wirkungsgrades, sprich dem Verhältnis von zugeführter Ladung zu abgegebener. Darüber hinaus kann anhand Formel 4.1 und des Ladefaktors auch die erforderliche Ladedauer ermittelt werden.²⁵

$$t = \frac{Q_0}{\eta I_s} \quad (4.1)$$

Q_0/As	Nennladungsmenge
t/s	Ladezeit
I_s/mA	Ladestrom
$\eta/1$	Ladewirkungsgrad

4.1 Ladephasen

Je nach Ladeverfahren besteht die Möglichkeit den Ladevorgang in bis zu vier Phasen zu unterteilen:²⁶

Die Vorladung – Der Ladevorgang wird mit einem sehr geringen Strom realisiert um dadurch unter Umständen entstandene Kurzschlüsse bei tiefentladenen Akkumulatoren zu erkennen, die bei höheren Strömen durch thermische Überlastung Schäden verursachen könnten. Es wird eine Akkumulator-Spannung definiert, welche nach Ablauf einer festgelegten Ladedauer erreicht werden muss. Ein Unterschreiten führt zur Beendigung des Ladevorgangs.

Die Hauptladung – Der Ladestrom wird für die Dauer der Hauptladung für Hauptreaktionen benötigt, elektrochemische Nebenreaktionen sind vernachlässigbar.

Die Nachladung – Während dieser Phase sind sowohl Hauptreaktionen, als auch Nebenreaktionen von Bedeutung: Die Ladegeschwindigkeit ist zu begrenzen.

Die Erhaltungsladung – Diese soll die durch Nebenreaktionen auftretende Selbstentladung kompensieren und so auch den unbelasteten Speicher auf dem gewünschten Ladungspegel halten.

²⁵ Vgl. Schulz (2014), S. 120.

²⁶ Vgl. Jossen/Weydanz (2006), S. 173 f.

4.2 Ladeverfahren

Es gibt unterschiedliche Möglichkeiten Akkumulatoren zu laden. Nicht jedes Ladeverfahren ist für jede Akkumulator-Technologie geeignet.

4.2.1 Laden mit konstantem Strom (CC-Ladung)

Dieses Ladeverfahren wird auch als *Constant-Current* oder *One-Current-Rate* Verfahren bezeichnet. Hierbei wird der Akkumulator über eine bestimmte Zeit mit einem konstanten Ladestrom aufgeladen. Die notwendige Zeit sollte durch den zuvor ermittelten Ladungszustand erhoben werden. Das Problem an diesem Verfahren liegt darin, dass es bei zu langer Dauer zu einer Überladung kommen kann. Diese Überladung kann bei manchen Technologien zu bleibenden Schäden und sogar zur vollständigen Zerstörung durch Brand oder Explosion führen. Dies gilt es selbstverständlich tunlichst zu vermeiden, wofür es grundsätzlich zwei Möglichkeiten gibt: Entweder man schaltet manuell innerhalb einer sicheren Zeit ab, oder der Ladevorgang wird von einem Managementsystem überwacht, welches gegebenenfalls den Ladevorgang stoppt.

Aus sicherheitstechnischen Gründen ist für einen Ladevorgang ohne Überwachung und Abschaltung daher die maximale C-Rate diverser Technologien beschränkt. Sollte es zum Beispiel aus zeitkritischen Gründen einen Ladestrom mit höherer C-Rate benötigen, ist eine Überwachung zwingend erforderlich.

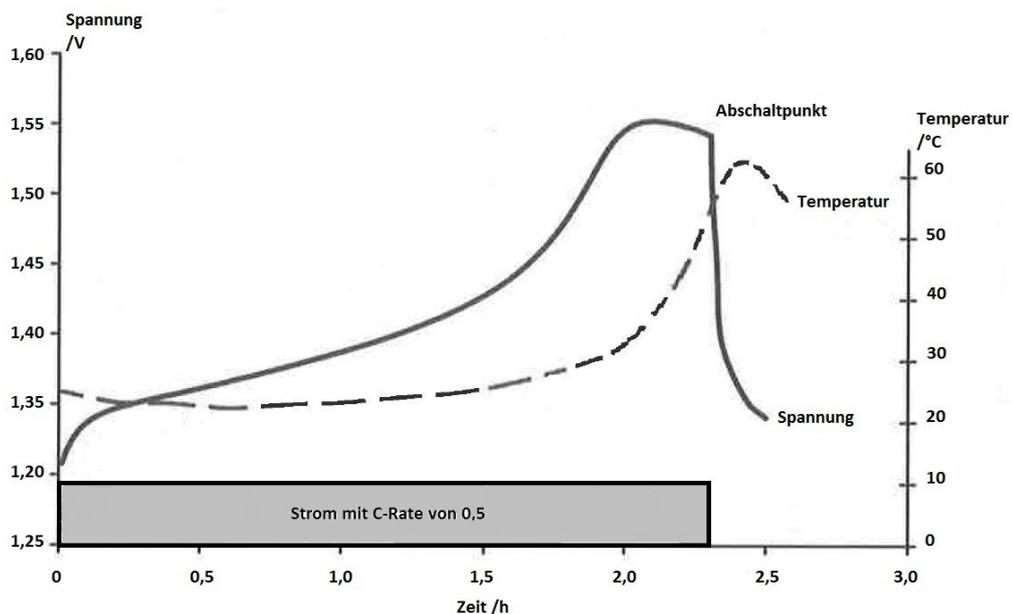


Abbildung 16: Spannungs- und Temperaturverlauf bei CC-Ladeverfahren mit Abschaltung, Quelle: Jossen/Weydanz (2006), S. 178 (leicht modifiziert).

Abbildung 16 zeigt beispielhaft den typischen Verlauf von Spannung und Temperatur bei Konstantstromladung mit Abschaltung anhand eines NiCd-Akkumulators. Unterschiedliche Technologien haben zwar auch unterschiedliche Verläufe von Spannung und Temperatur, im Wesentlichen ähneln sich diese jedoch in ihrem Verhalten, markante Punkte sind immer erkennbar. Deswegen gibt es für die Abschaltung drei mögliche Kriterien: Spannungslevel, Temperatur und Zeit.

Modifizierte und abgewandelte Konstantstromladeverfahren sind unter anderem:

4.2.1.1 Das Pulsladeverfahren

Beim Pulsladeverfahren wird die Zellspannung permanent überwacht und daraus der Ladezustand des Akkumulators abgeleitet. Deswegen wird es auch als *Konstantstromladeverfahren mit Spannungsüberwachung* bezeichnet. Während zum Beispiel anfangs das Verhältnis von Ladezeit zu Pausen recht groß sein kann, nimmt dieses mit steigender Ladung sukzessive ab.

Wie aus Abbildung 16 ersichtlich, sinkt die Spannung nach Erreichen der vollen Ladung und ist deswegen auch für die Abschaltung geeignet beziehungsweise dient sie als Indikator um die Pausenzeiten beim Laden zu erhöhen. Das ist zugleich eine Möglichkeit die Erhaltungsladung umzusetzen und zu diesem Zeitpunkt die Pausenzeiten zu verlängern. Gut funktioniert diese Methode des Ladens jedoch nur, wenn für den Ladestrom eine entsprechende C-Rate gewählt werden kann und die Temperatur nicht zu niedrig ist.

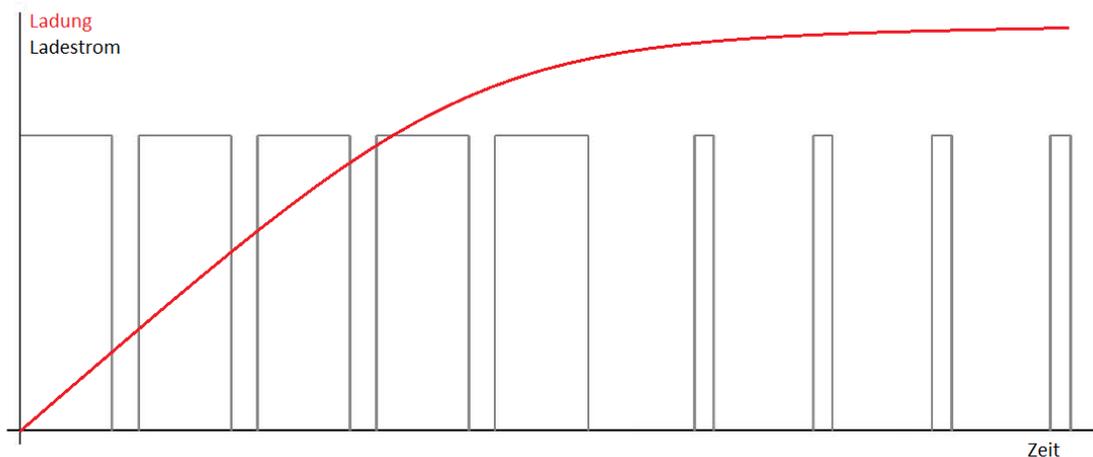


Abbildung 17: Gepulster Konstantstrom und Ladung, Quelle: Schulz (2014), S. 123 (leicht modifiziert).

4.2.1.2 Das Reflexladeverfahren

Dieses ähnelt dem Pulsladeverfahren. Während bei diesem nur ein Ladestrom moduliert wird, kommt es beim Reflexladevorgang zusätzlich zwischen den Pausen auch zu einem Entladestrom, der gewollt ist. Dieser verhindert bei hohen Ladeströmen die unerwünschte Sauerstoffbildung an der positiven Elektrode beziehungsweise dämmt diese ein. Somit wird einer Erhöhung des Innenwiderstandes und in weiterer Folge der Temperatur entgegengesteuert.²⁷

4.2.2 Laden mit konstanter Spannung (CP-Ladung)

Beim *Constant-Potential* Verfahren wird, wie schon aus der Bezeichnung zu vermuten, eine konstante Ladespannung angelegt. Um den Ladestrom, der vor allem anfänglich verhältnismäßig hoch werden würde,

²⁷ Vgl. Schulz (2014), S. 124.

begrenzen zu können, wird ein entsprechender Vorwiderstand verwendet.²⁸ Je weiter die Ladung fortgeschritten ist, desto geringer wird der Ladestrom.

Am gängigsten sind letztendlich aber Kombinationen aus CC-Ladung und CP-Ladung. Moderne Ladecontroller setzen zusätzlich auch das Pulsverfahren ein und können zum Beispiel den C-Faktor des Ladestroms anpassen, um somit den Ladevorgang zu optimieren.

4.2.3 Laden mit konstantem Strom und konstanter Spannung (CC-CV-Ladung)

Der in der Fachliteratur auch als *Constant Current Constant Voltage* Verfahren bekannte Ladevorgang verbindet das Konstantstrom- und das Konstantspannungsverfahren. Zu Beginn wird mittels konstantem Ladestrom der Akkumulator solange geladen, bis die Ladeschlussspannung (höchstzulässige Spannung) erreicht wird und man somit in etwa 70 % bis 80 % der Sollkapazität erreicht hat.²⁹ Die Messung der Ladeschlussspannung muss sehr genau erfolgen, weil deren Überschreitung bei einzelnen Technologien zu Schäden führen kann. So ist zum Beispiel für Lithiumionenakkumulatoren eine Messgenauigkeit von 1 % gefordert.³⁰ Anschließend wird mit konstanter Spannung der Akkumulator vollständig aufgeladen. In dieser Phase sinkt der Ladestrom, bis er einen für die Abschaltung erforderlichen Mindestwert erreicht. Eine weitere Möglichkeit der Abschaltung ist es, in Abhängigkeit der Zeit, den Ladevorgang zu stoppen. Dieses Verfahren ist aber etwas ungenauer beziehungsweise die Ladeschlussspannung betreffend nicht sehr sicher und wird deswegen eher der Abschaltung in Abhängigkeit des Stromes untergeordnet. Die Zeit müsste zudem variabel sein, weil sich der Innenwiderstand der Zellen über die Lebensdauer und in Abhängigkeit der Temperatur verändert, sich die Phasen mit konstantem Strom zu laden und mit konstanter Spannung verlagern und zudem der gesamte Ladevorgang etwas länger dauert.³¹

²⁸ Vgl. Schulz (2014), S. 127.

²⁹ Vgl. Schulz (2014), S. 126.

³⁰ Vgl. Jossen/Weydanz (2006), S. 194.

³¹ Vgl. Jossen/Weydanz (2006), S. 195 f.

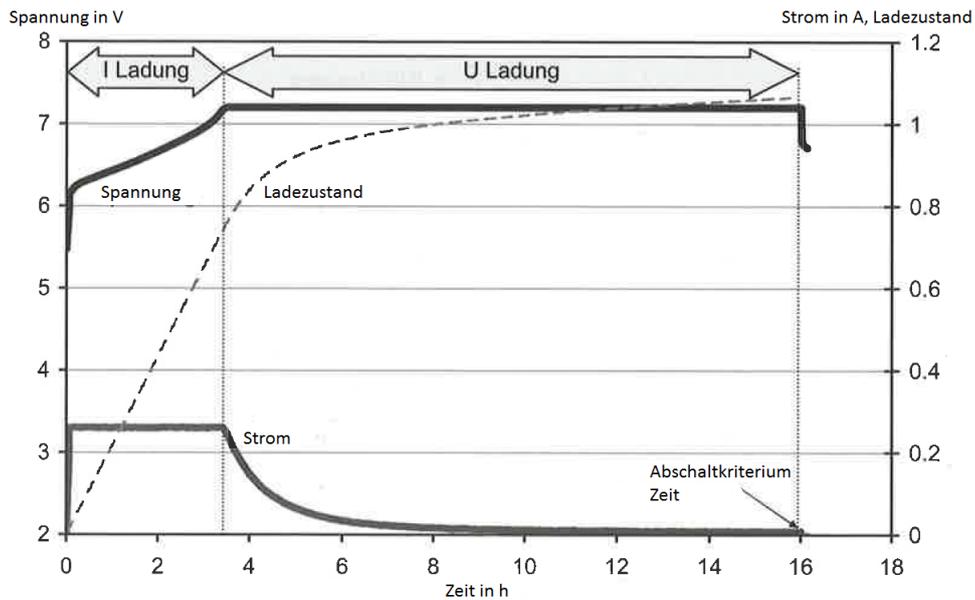


Abbildung 18: CC-CV-Ladung mit Abschaltung am Beispiel eines Bleiakкумуляtors, Quelle: Jossen/Weydanz (2006), S. 200.

Modifizierte und abgewandelte kombinierte Ladeverfahren sind zudem:

4.2.3.1 Laden mit konstantem Strom und unterschiedlichen, konstanten Spannungen

Dieses Ladeverfahren dient dazu, die Ladezeit bei Dauerladen zu verkürzen. Bis zum Erreichen des vollständigen Ladezustandes wird mit einer höheren Spannung gearbeitet. Um Überladungen zu vermeiden, wird diese dann reduziert.

Ladestrom	0,1-0,3 C-Rate
Ladespannung Phase 1	2,4-2,45 V/Zelle
Ladespannung Phase 2	2,23-2,30 V/Zelle

Tabelle 2: Typische Kennwerte bei Laden eines Bleiakкумуляtors, Quelle: Jossen/Weydanz (2006), S. 201.

4.2.3.2 Laden mit unterschiedlichen, konstanten Strömen und konstanter Spannung

Ähnlich wie bei zuvor erläuterten Prozedere funktioniert das Ladeverfahren mit unterschiedlichen Konstantströmen. Durch eine anfängliche Ladung mit einer C-Rate von 0,2 bis 0,3 wird der Akkumulator rasch geladen. Für die Nachladung ist dann eine C-Rate von 0,04 ausreichend.³² Man erzielt mit dieser Technik neben einer Aufhebung und einem Ausgleich der Säureschichtung zwischen den Zellen zugleich eine Reduktion der Ladedauer. Wie bei den anderen Ladeverfahren, ist es auch hierbei notwendig unbedingt ein Überladen durch rechtzeitiges Abschalten zu unterbinden.

³² Vgl. Jossen/Weydanz (2006), S. 201.

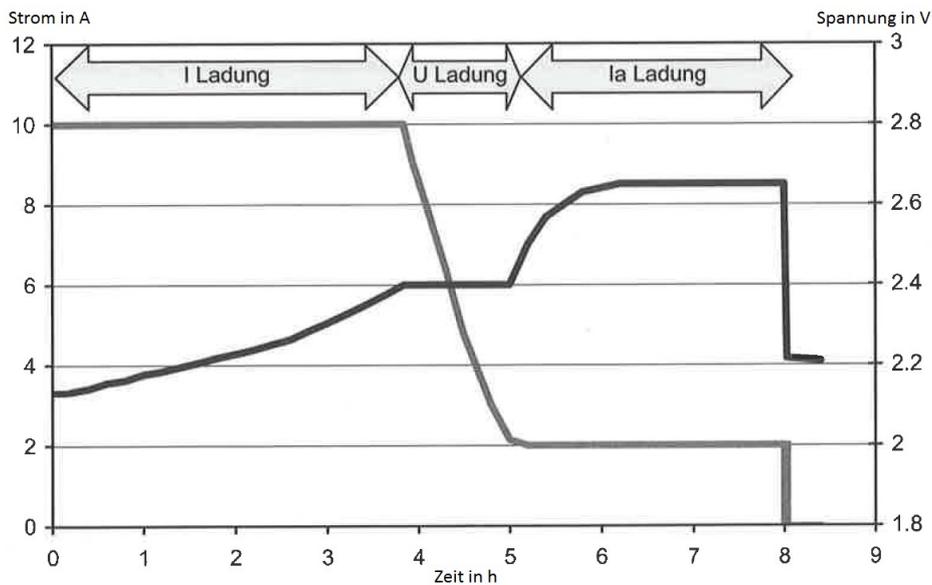


Abbildung 19: IUI-Ladung mit Abschaltung am Beispiel eines Bleiakкумуляtors, Quelle: Jossen/Weydanz (2006), S. 201.

4.2.4 Das Widerstandsladeverfahren

Das auch als W-Ladeverfahren bekannte Widerstandsladeverfahren zählt zu den einfachsten Möglichkeiten und wird bei unregulierten Ladegeräten angewandt. Dabei wird der Ladestrom durch einen Vorwiderstand beziehungsweise den Innenwiderstand begrenzt. Aus dem Zusammenhang von Ladestrom und Batteriespannung ergibt sich somit, dass mit zunehmender Ladung der Ladestrom sinkt. Als kritisch stellt sich bei diesem unregulierten Verfahren heraus, dass der Ladestrom von der Netzspannung abhängig ist.³³

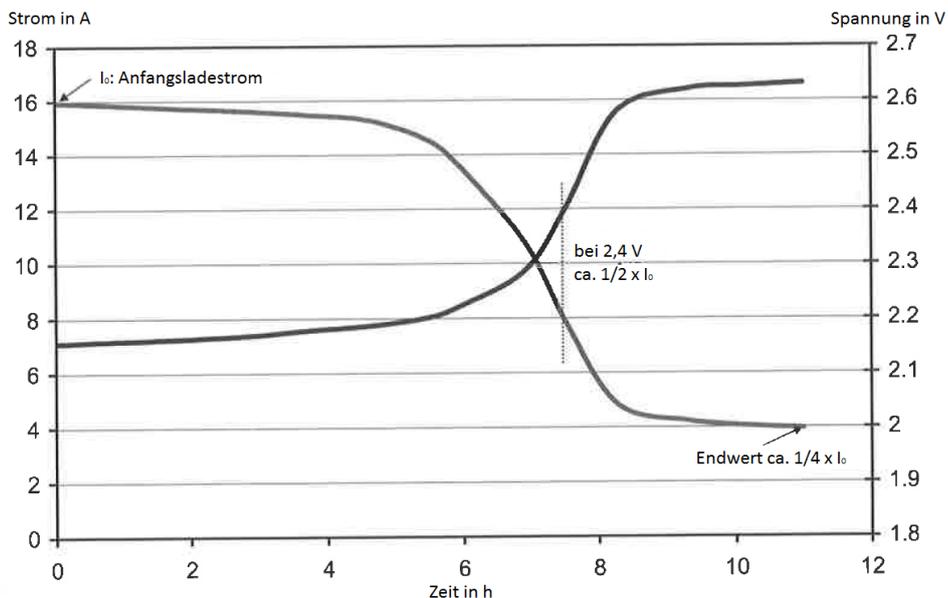


Abbildung 20: Typischer Verlauf von Ladestrom und Spannung bei W-Ladung, Quelle: Jossen/Weydanz (2006), S. 203.

³³ Vgl. Jossen/Weydanz (2006), S. 202.

5 DER BLEIAKKUMULATOR

Historisch betrachtet handelt es sich hierbei um die älteste Form von wieder aufladbarer Batterietechnologie, die nebenbei auch heute die am meisten verwendete Batterie- beziehungsweise Akkumulator-Ausführung ist. Dementsprechend gut erforscht und ausgereift sind diese Systeme. Wie auch im Fall von Lithiumionenakkumulator und Doppelschichtkondensator basiert beim Bleiakkumulator die Funktionsweise auf einem elektrochemischen Prozess.

Die reversible Zellspannung (darunter versteht man die Potenzialdifferenz der Elektroden in stromlosem Zustand) eines Bleiakkumulators liegt bei 2,048 V – gilt bei einer Temperatur von 298 K und einem Luftdruck von 10325 Pa – und zählt neben der Zellspannung von Lithiumbatterien zu den höchsten im Bereich der konventionellen Batterien und Akkumulatoren:³⁴

$$\Delta E^0 = E_{Kathode}^0 - E_{Anode}^0 \quad (5.1)$$

Diese lässt sich aus den verwendeten Elektrodenmaterialien Bleidioxid (PbO₂) und Blei (Pb) anhand der elektrochemischen Spannungsreihe ableiten.

$$\Delta E^0 = 1,69 \text{ V} - (-0,358 \text{ V}) = 2,048 \text{ V} \quad (5.2)$$

Basierend auf dem Material der Elektroden und unter Einwirkung von Sauerstoff anstelle von Umgebungsluft, ergeben sich für eine Bleizelle die Werte gemäß Tabelle 3. Eine von SI Einheiten abweichende Beschreibung der jeweiligen Kenngrößen hat sich in den meisten literarischen Werken und im allgemeinen Gebrauch durchgesetzt.

Theoretische Kennwerte		Praxisnahe Kennwerte		
Zellspannung / V	Energiedichte je Gewichtseinheit / Wh/kg	Zellspannung / V	Energiedichte je Gewichtseinheit / Wh/kg	Energiedichte je Volumeneinheit / Wh/l
2,1	252	2,0	35	70

Tabelle 3: Kennwerte eines Bleiakkumulators, Quelle: Reddy (Hrsg.) (2014), S. 1.13.

Wie man dieser Tabelle entnehmen kann, hängt die Energiedichte sowohl von der Masse, als auch dem Volumen der Zelle, der Batterie oder des Akkumulators ab. Diese Tatsache ist unter anderem auf das faradaysche Gesetz zurückzuführen.

Als Elektrolyt wird zum Beispiel bei offenen Systemen 37 %ige Schwefelsäure in flüssiger Form verwendet, bei geschlossenen ist eine gelartige Lösung in Verwendung, was durch Beimischen von Kieselsäure zur Schwefelsäure erreicht wird. Dies hat den Vorteil, dass die Zersetzung des Elektrolyten vermieden werden kann. Somit ist es nicht mehr notwendig Wasser nachzufüllen, was die Handhabung natürlich wesentlich vereinfacht. Mittlerweile gibt es diverse weitere Entwicklungen der Bleiakkumulatoren, dazu zählen einerseits die sogenannten *Absorbent Glass Matt Akkumulatoren* (AGM-Akkus), andererseits auch die

³⁴ Vgl. Kurzweil/Dietmeier (2015), S. 256.

Enhanced Flooded Battery (EFB). Bei ersterer wird ein Glasfaservlies in der Batterie verbaut, um mit diesem die Batteriesäure zu binden.³⁵

Zu den Vor- und Nachteilen dieser Technologie zählen laut Literatur:³⁶

- Mechanische Beanspruchungen durch Vibration sind gut verträglich;
- Die Zyklenzahl ist um bis zu Faktor 3 höher als bei herkömmlichen Bleibatterien;
- Geringer Innenwiderstand;
- Gute Verträglichkeit von Tiefentladungen;
- Temperaturempfindlich, steigende Temperaturen (zirka ab 53 °C) sind zu vermeiden;
- Zu hohe Ladespannung führt zu Vergasung und letztendlich zu einem Überdruck, welcher über ein Sicherheitsventil abgelassen wird.
- Für den Einsatz in Elektrofahrzeugen ist diese Technologie eher ungeeignet;

Betrachtet man vergleichsweise einen EFB Akkumulatör, welcher mit einem Gittergeflecht, das die positiv geladenen Platten verstärkt (der sogenannte *Polyester-Scrim*), so zeichnet sich dieser zusätzlich durch nachfolgende Eigenschaften aus:³⁷

- Gut geeignet für schnelle Lade- und Entladevorgänge;
- Die Zyklenzahl ist um bis zu Faktor 2 höher als bei herkömmlichen Bleibatterien;
- Diese Technologie ist eher unverträglich gegenüber Tiefentladungen;

Man kann bei Bleiakкумуляtoren von einer Zyklenzahl die sich im Bereich von 200 bis 2000 Zyklen bewegt ausgehen, je nach Ausführung.

5.1.1 Laden von Bleiakкумуляtoren

Um die Lebensdauer und die Zyklenzahl eines Bleiakкумуляtors bestmöglich zu optimieren, sind für das Aufladen einige Faktoren zu berücksichtigen.

Hohe Ladeströme beziehungsweise schnelle Ladevorgänge sollten vermieden werden und sind nur zu Beginn des Ladevorgangs verträglich. Solange Überhitzung und Überladung vermieden werden, zeichnet sich der Bleiakкумуляtor durch seine gute Robustheit aus. Aus diesem Grund kommen, je nach Aufbau des Bleiakкумуляtors, mehrere, der zuvor beschriebenen, Ladeverfahren in Frage. Zu den gängigsten zählen das CC-Verfahren, das CC-CV-Verfahren und diverse modifizierter Varianten dieser. Wichtig dabei ist es, eine Überwachung und gegebenenfalls Abschaltung zu berücksichtigen.

Der Bleiakкумуляtor sollte mit nur 0,1 C geladen werden!³⁸

Um der Ausprägung des Memory Effekts entgegenzuwirken, sollten unvollständige Auf- und Entladungen vermieden werden. Dennoch sind die Lebensdauer und die Zykluszeit eines Bleiakкумуляtors am

³⁵ Vgl. Schulz (2014), S. 34.

³⁶ Vgl. Schulz (2014), S. 34.

³⁷ Vgl. Schulz (2014), S. 36.

³⁸ Vgl. Schulz (2014), S. 147.

höchsten, wenn dieser nur im Teillastbetrieb verwendet wird. Man spricht in diesem Fall von Bereichen zwischen 40 % und 70 % des Ladezustandes.³⁹

Entladetiefe Dod /%	10	40	40-70	80
Zyklenzahl	6000	1250	5500	700
Energiedurchsatz /Ah	86000	71500	235950	80000

Tabelle 4: Zyklenzahl eines 143 Ah Valve-Regulated-Lead-Acid (VRLA) Bleiakkumulators in Abhängigkeit der Belastung, Quelle: Kurzweil/Dietlmeier (2015), S. 264.

5.1.1.1 Der Memory Effekt

Dieser tritt nicht nur bei Nickelakkumulatoren auf, sondern auch bei Bleiakkumulatoren. Dabei kommt es durch sich wiederholende Teilladungen und Teilentladungen zur Bildung von großen Kristallen innerhalb des Akkumulators. Auch geringe Ladeströme fördern diese Kristallbildung.⁴⁰ Salopp formuliert merkt sich der Akkumulator sozusagen wieviel Ladungsmenge tatsächlich benötigt wird. Dadurch kommt es zu einem vorzeitigen Spannungseinbruch und letztendlich zur geringeren, verfügbaren Ladungsmenge. Gute Ladegeräte sind einerseits in der Lage diesen Prozess ohnedies zu unterbinden, sollte es dennoch passiert sein, gibt es andererseits auch Möglichkeiten den Akkumulator wieder aufzufrischen und die Kristalle wieder zu lösen.

5.1.2 Entladung von Bleiakkumulatoren

5.1.2.1 Die Entladekurve eines Bleiakkumulators

Bei der Entladung von Bleiakkumulatoren gibt es grundsätzlich drei Abschnitte die der Entladekurve zu entnehmen sind, wobei der Verlauf dieser Kurve zusätzlich noch vom Entladestrom und der Temperatur abhängig ist:⁴¹

1. Im Fall einer vollgeladenen Zelle bricht die Spannung anfangs massiv ein. Man bezeichnet diesen Einbruch auch als Spannungssack, welcher mit der Bildung von Kristallisationskeimen begründet ist.
2. In diesem Bereich kommt es zu einem über die Zeit betrachtet annähernd linearem Spannungsrückgang. In dieser Phase sinkt die Ruhespannung wegen des Abbaus von Sulfationen, während zugleich der Innenwiderstand zunimmt.
3. In der letzten Phase kommt es bedingt durch eine Abnahme der Reaktanten zu einem Spannungseinbruch.

³⁹ Vgl. Kurzweil/Dietlmeier (2015), S. 264.

⁴⁰ Vgl. Jossen/Weydanz (2006), S. 49.

⁴¹ Vgl. Jossen/Weydanz (2006), S. 47 f.

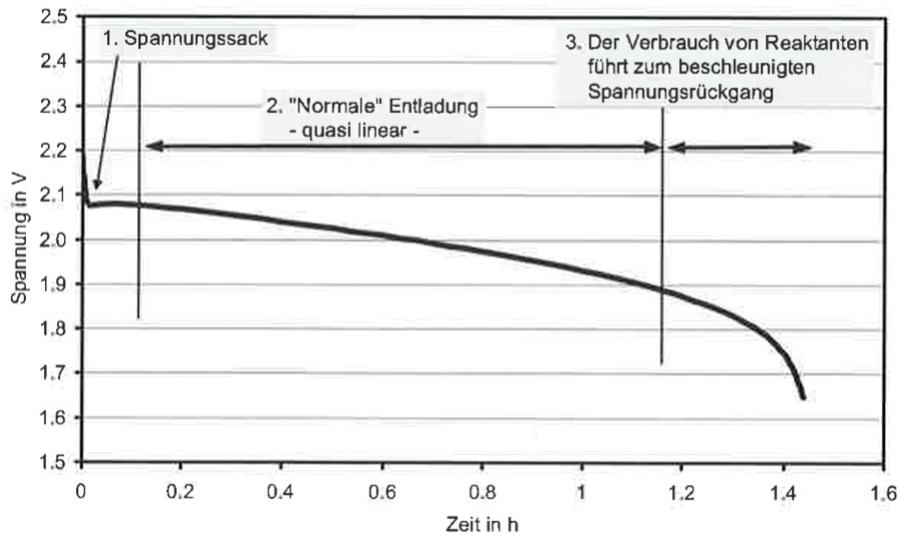


Abbildung 21: Typische Entladekurve eines Bleiakкумуляtors, Quelle: Jossen/Weydanz (2006), S. 49.

5.1.2.2 Einfluss des Entladestroms auf die Ladungsmenge

Ein zunehmender Entladestrom verringert die verfügbare Ladungsmenge beziehungsweise verursacht einen frühzeitigen Spannungseinbruch. Dies liegt einerseits daran, dass bedingt durch den Innenwiderstand der Zelle an eben diesem der Spannungsabfall mit Stromzunahme steigt. Andererseits reduziert sich die Menge des verfügbaren Aktivmaterials an den Elektroden.⁴²

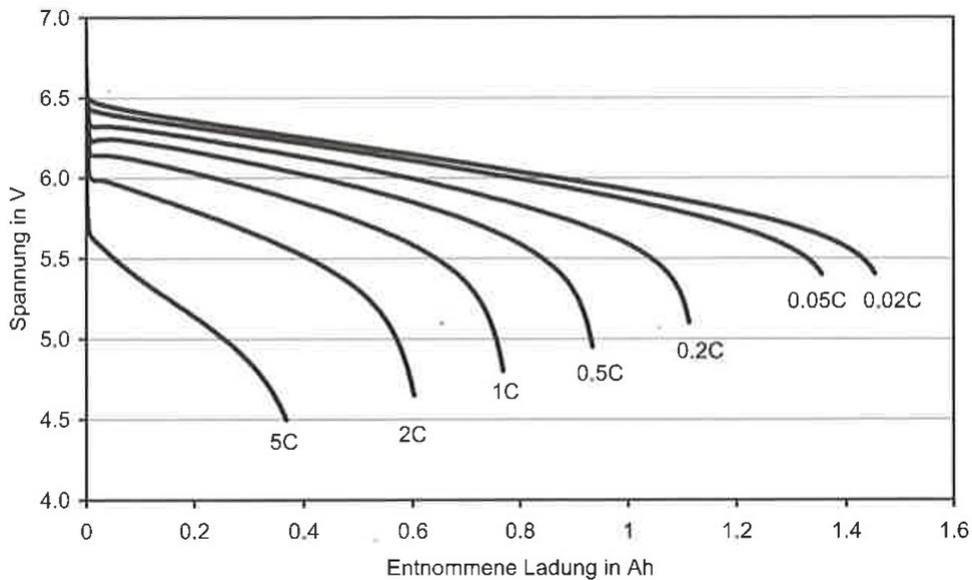


Abbildung 22: Typische Entladekurve eines Bleiakкумуляtors (1,3 Ah, 6 V) mit unterschiedlichen Entladeströmen bei 20 °C, Quelle: Jossen/Weydanz (2006), S. 50.

Wie in Kapitel 3.1 erläutert, beschreibt den Zusammenhang von Entladestrom und Ladungsmenge die *Peukert Gleichung*.

⁴² Vgl. Jossen/Weydanz (2006), S. 49.

Der Einflussfaktor des Entladestroms hängt zusätzlich auch vom spezifischen Akkumulator-Typ ab. Sogenannte Hochstromakkumulatoren sind gegenüber einer hohen C-Rate verträglicher als Standardakkumulatoren. Grundsätzlich kann man aber behaupten, dass der Bleiakкумуляtor sehr gut funktioniert, wenn er mit geringen Strömen betrieben wird.

Aus den nun bekannten Einflüssen und Faktoren würde eine typische Lade- und Entladekurve eines Bleiakкумуляtors den in Abbildung 23 dargestellten Verlauf haben.

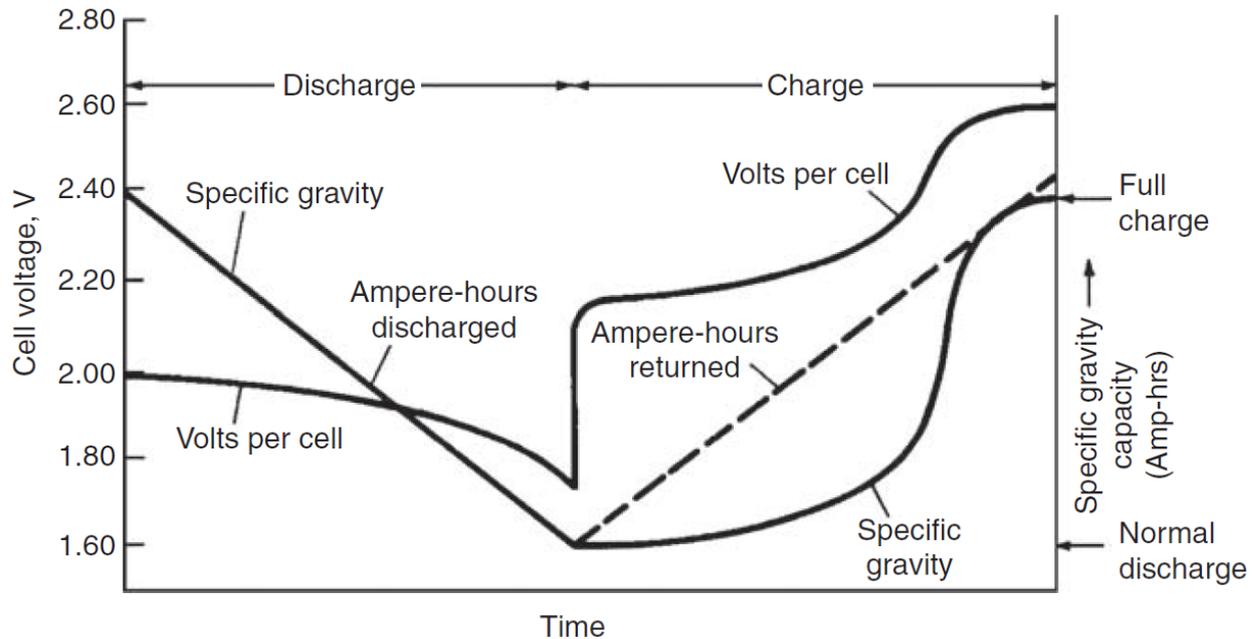


Abbildung 23: Typischer Spannungsverlauf und spezifische Kapazität eines Bleiakкумуляtors bei Entladen und Laden mit konstantem Strom, Quelle: Reddy (Hrsg.) (2014), S. 16.10.

5.1.3 Selbstentladung des Bleiakкумуляtors

Wie bei anderen elektrochemischen Speichern kommt es auch bei Bleiakкумуляtoren, unabhängig von deren Ausführung, zu chemischen Prozessen im Leerlauf. Wie bereits in Kapitel 3.6 erwähnt, hängt der Grad der Selbstentladung neben der Technologie und der Bauweise zusätzlich stark von der Temperatur ab. Steigende Temperaturen erhöhen die Selbstentladungsrate eines Bleiakкумуляtors drastisch.⁴³ Wie Abbildung 24 zu entnehmen ist, kann man etwa damit rechnen, dass sich ein Bleiakкумуляtor bei einer Lagerungstemperatur von 10 °C in 2 Jahren zu 50 % selbst entlädt. Steigt die Temperatur auf 40 °C, ist bereits nach einem halben Jahr mit der gleichen Selbstentladungsrate zu rechnen.

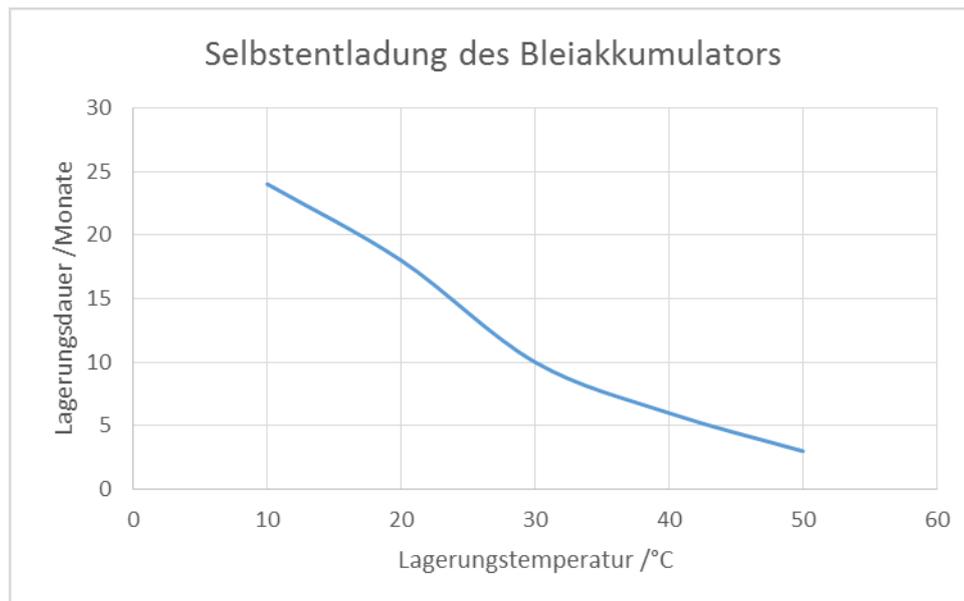


Abbildung 24: Abhängigkeit der Lagerungsdauer von Lagerungstemperatur bis 50 %iger Selbstentladung, Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Werte von Schulz (2014), S. 42.

Bei sachgemäßer Verwendung und Lagerung kann man in etwa mit einer Selbstentladungsrate zwischen 1 % und 3 %⁴⁴ rechnen, andere Quellen gehen auch von bis zu 5 %⁴⁵ aus.

⁴³ Vgl. Schulz (2014), S. 28.

⁴⁴ Vgl. Schulz (2014), S. 22 f.

⁴⁵ Kurzweil/Dietlmeier (2015), S. 19.

5.1.4 Optimaler Betrieb und Nachhaltigkeit

Zusätzlich zu bereits erläuterten Betriebshinweisen kann durch Berücksichtigung weniger Punkte die Lebensdauer eines Bleiakкумуляtors bestmöglich ausgeschöpft werden. Diese sollten wegen Kostenersparnis und in Hinblick auf Umweltschutz, da die Ressource optimal genutzt wird, beachtet werden:⁴⁶

- Wenn ein Akкумуляtor permanent im mittleren Teillastbetrieb verwendet wird, empfiehlt sich zumindest monatlich eine Vollladung.
- Vorzugsweise sollte die Temperatur sowohl im Betrieb, als auch während der Lagerung gering gehalten werden. Jedoch sollte sie nicht unter -5 °C absinken.
- Nach Möglichkeit ist der Akкумуляtor in vollgeladenem Zustand zu lagern.
- Einen Akкумуляtor langfristig in entladene Zustand zu halten, sollte vermieden werden.
- Eine vollständige Entladung ist nicht empfehlenswert.

Aus Sicht der Nachhaltigkeit betrachtet, sollte man bedenken, dass die Herstellung von Bleiakкумуляtoren vergleichsweise zu anderen Technologien den geringsten Energiebedarf hat und auch den geringsten CO₂ Ausstoß verursacht.

5.1.5 Sicherheitshinweise beim Umgang mit Bleiakкумуляtoren

Für den Betrieb von Bleibatterien und Bleiakкумуляtoren wurde eigens die EN 50727 verfasst, welche sich mit den Sicherheitsvorschriften auseinandersetzt. Diese gilt es zu beachten. Weil die Tatsache einer möglichen Wasserstoffbildung bei Verwendung von Bleiakкумуляtoren zu bedenken ist, muss eine entsprechende Belüftung vorgesehen sein. Damit muss sichergestellt werden, dass der Wasserstoffanteil in Luft den Explosionswert von 4 % nicht überschreitet! Detaillierte Anforderungen bezüglich notwendiger Luftmenge ist der EN 50727 zu entnehmen.

⁴⁶ Vgl. Jossen/Weydanz (2006), S. 61.

6 LITHIUMSYSTEME

Lithium ist das leichteste Metall und wiegt nur $0,534 \text{ g/cm}^3$ bei $20 \text{ }^\circ\text{C}$. Wie der elektrochemischen Spannungsreihe (siehe Tabelle 1) zu entnehmen ist, hat Lithium ein Normalpotential E_0 von $-3,04 \text{ V}$, was zugleich auch das höchste aller Normalpotentiale ist. Diese Eigenschaften ermöglichen es verhältnismäßig große Energie- und Leistungswerte zu erreichen.⁴⁷

Die Entstehungsgeschichte der wieder aufladbaren Lithiumsysteme begann in den 70er Jahren des 20. Jahrhunderts in München. Mittlerweile haben Lithiumsysteme durch ihre vielseitigen Einsatzmöglichkeiten und die Möglichkeit sie in unterschiedlichsten Formen bauen zu können einige andere Batterie- und Akkumulator-Anwendungen, unter anderem die Nickel-Metallhydrid-Technologie, ersetzt und sind als solche aus unserem Alltag derzeit nicht mehr wegzudenken. Deswegen wird bei der Technologierecherche auf Nickelsysteme keine Rücksicht genommen.

Jedoch gestalteten sich die ersten Jahre der Entwicklung von Lithiumsystemen äußerst schwierig und gefährlich. Das liegt vor allem an der Eigenschaft von Lithium mit Wasser besonders stark zu reagieren, was zur Bildung von reaktivem Wasserstoff führt. Deswegen wurde der erste Lithiumakkumulator bereits nach rund neun Jahren Existenz wieder vom Markt genommen. Aus diesem Grund werden heutzutage Elektrolyte auf Basis organischer Lösungsmittel verwendet, anstelle von wässrigen.⁴⁸ Zusätzlich wird Lithium auch nicht mehr in metallischer Form eingesetzt. Es werden nur Lithiumionen durch Herstellung diverser Einlagerungsverbindungen als Ladungsträger genutzt. Dieser Sachverhalt war nebenbei für die Namensgebung ausschlaggebend.

Als geeignetes Kathodenmaterial entdeckte und patentierte 1981 Herr John Bannister Goodenough *Lithium-Cobalt-Dioxid* (LiCoO_2), welches in Verbindung mit einer amorphen Kohlenstoff Anode zu einer erfolgreichen und richtungsweisenden Zellentechnologie führte. Beispielsweise Sony nutzte dieses Patent um anfänglich Camcorder damit zu versorgen.⁴⁹

6.1 Verbreitete Lithiumionensysteme

Im allgemeinen Sprachgebrauch hat sich der pauschale Begriff Lithiumionenakkumulator durchgesetzt, obwohl genauer betrachtet hier eigentlich zwischen unterschiedlichen Systemen zu unterscheiden ist. Unter anderem durch den Einsatz unterschiedlicher Elektrodenmaterialien haben diese auch voneinander abweichende, zu beachtende Eigenschaften, unterschiedliche Stärken und Schwächen. Diese werden in nachfolgenden Kapiteln kurz gegenübergestellt. Zur Gruppe der Lithiumionensysteme zählen:⁵⁰

⁴⁷ Vgl. Kurzweil/Dietlmeier (2015), S. 157.

⁴⁸ Vgl. Korthauer (Hrsg.) (2013), S. 4.

⁴⁹ Vgl. Korthauer (Hrsg.) (2013), S. 157.

⁵⁰ Vgl. Schulz (2014), S. 79. bis S. 91.

6.1.1 Der Lithiumion-Kobalt-Akkumulator (Li-Ion)

Dabei handelt es sich um das älteste Mitglied in der Familie der Lithiumionensysteme und zugleich um den Hauptverursacher warum Lithiumionenakkumulatoren den Ruf haben zu explodieren. Das liegt daran, dass diese vor allem auf Erschütterungen sehr empfindlich reagieren und im schlimmsten Fall explosionsartig entflammen. Wegen der im Vergleich zu anderen, neueren Lithiumionentechnologien, hohe Energiedichte werden diese auch nach wie vor eingesetzt. Eine zusätzliche positive Eigenschaft ist die konstante Spannung, die während der Entladung zur Verfügung steht.⁵¹

Zellenspannung	/ V	3,6
Min. Zellenentladespannung	/ V	2,5
Ladezyklen		200-500
Monatliche Selbstentladung	/ %	5-8
Max. Entladestrom		≤ 12 C
Energiedichte	/ Wh/kg	110-190

Tabelle 5: Kennwerte des Lithiumion-Kobalt-Akkumulators, Quelle: Schulz (2014), S. 80.

6.1.2 Der Lithiumion-Mangan-Akkumulator (Li-Mn)

Durch die kontinuierlich steigende Nachfrage und den Bedarf immer leistungsstärkerer Systeme, die nach Möglichkeit zugleich auch in kürzester Zeit geladen werden können, entwickelte sich neben anderen Technologien jene, bei der Elektroden aus Mangan eingesetzt werden. Durch den reduzierten Innenwiderstand sind sehr hohe Ströme zulässig, mit denen diese Akkumulatoren belastet werden können. Man spricht hier von Stromstärken im Bereich von 30 A dauerhaft, bis hin zu 50 A Spitzenströmen.⁵²

Zellenspannung	/ V	3,7-3,8
Min. Zellenentladespannung	/ V	2,5
Ladezyklen		> 1000
Monatliche Selbstentladung	/ %	~5
Max. Entladestrom		
Energiedichte	/ Wh/kg	110-120

Tabelle 6: Kennwerte des Lithiumion-Mangan-Akkumulators, Quelle: Schulz (2014), S. 81.

Eingesetzt werden diese in Bereichen, wo eine hohe Leistungsfähigkeit gefordert ist.

⁵¹ Vgl. Schulz (2014), S. 80.

⁵² Vgl. Schulz (2014), S. 80 f.

6.1.3 Der Lithium-Eisenphosphat-Akkumulator (LFP)

Zu den Vorteilen dieser Technologie zählen die niedrigen Herstellungskosten, dank der hohen Verfügbarkeit von Eisenphosphat, der Lithium-Eisenphosphat-Akkumulator ist relativ umweltfreundlich und zusätzlich sehr sicher. Er tendiert nicht dazu sich zu entzünden, auch nicht bei anspruchsvollen Bedingungen. Hier ist zum Beispiel der hohe zulässige Temperaturbereich, welcher zwischen -45 °C und $+80\text{ °C}$ liegt, erwähnenswert, der kaum zu Kapazitätsverlust führt, während wie in vorangegangenen Kapiteln mehrfach erwähnt, die Temperatur bei anderen Technologien einen massiven Einfluss auf die Performance hat. Die gleiche Leistung bringt auch diese Technologie freilich nicht über das gesamte Temperaturband, so ist bei Temperaturen unter $+5\text{ °C}$ mit einem Spannungsrückgang ab einem Entladestrom von $0,5\text{ C}$ und mehr, zu rechnen.⁵³

Zellenspannung	/ V	3,0-3,3
Min. Zellenentladespannung	/ V	~2,75
Ladezyklen		> 5000
Monatliche Selbstentladung	/ %	3-5
Max. Entladestrom		$\leq 40\text{ C}$
Energiedichte	/ Wh/kg	110-120

Tabelle 7: Kennwerte des Lithium-Eisenphosphat-Akkumulators, Quelle: Schulz (2014), S. 82.

Eine nennenswerte Schwäche, beziehungsweise was es zu bedenken gilt, ist, dass die Akkumulatoren äußerst empfindlich gegenüber Überladungen reagieren, was sich durch Verkürzung der Lebensdauer bemerkbar macht. Deswegen ist es unbedingt notwendig das Ladeverfahren entsprechend sorgfältig handzuhaben.

6.1.4 Der Lithium-Titanat-Akkumulator (LTO)

Während andere Lithiumionentechnologien den Fokus darauf legen durch Änderungen an der Kathode die Bildung einer passiven Schicht, der *Solid Electric Interface (SEI)*, an der Kohlenstoff Anode zu mindern, weil diese Schicht den Innenwiderstand erhöht, wird bei Lithium-Titanat-Akkumulatoren das Augenmerk auf die Anodeneigenschaften gelegt. Das Resultat ist ein massiver Rückgang der SEI Bildung, was sich in der Möglichkeit den Akkumulator in nur zehn Minuten bis zu 90 % der Nennkapazität zu laden, positiv bemerkbar macht.⁵⁴ Eine zusätzliche Stärke ist ein ähnlicher Temperaturbereich wie jener der Lithium-Eisenphosphat Systeme, wo der Lithium-Titanat-Akkumulator eingesetzt werden kann. Er ist sicher und tendiert nicht zu brennen oder zu explodieren. Mit Tiefentladungen und Überladungen kommt er zudem gut zurecht. Die Energiedichte von nur 70 Wh/kg bis 90 Wh/kg , die geringe Zellennennspannung und der hohe Preis stellten in den vergangenen Jahren noch Gründe dar, warum sich dieser Akkumulator noch nicht durchsetzen konnte.

⁵³ Vgl. Schulz (2014), S. 81.

⁵⁴ Vgl. Schulz (2014), S. 83.

Zellenspannung	/ V	2,0-2,5
Min. Zellenentladespannung	/ V	~2,75
Ladezyklen		10000-20000
Monatliche Selbstentladung	/ %	~3
Max. Entladestrom		≤ 50 C
Energiedichte	/ Wh/kg	70-90

Tabelle 8: Kennwerte des Lithiumion-Titanat-Akkumulators, Quelle: Schulz (2014), S. 84.

6.1.5 Die Super Charge Ion Battery (SCiB)

Eine, zumindest die Schnellladefähigkeit betreffend, verbesserte und weiterentwickelte Abwandlung der Lithium-Titanat-Technologie ist die Super-Charge-Battery von Toshiba. Nennenswerte Unterschiede sind die verbesserte Schnellladefähigkeit, die geringere Energiedichte und die etwas geringere Zyklenzahl. Bezüglich Sicherheit und Temperaturbereich decken sich die Eigenschaften annähernd mit jener des Lithium-Titanat-Akkumulators.

Zellenspannung	/ V	2,3
Min. Zellenentladespannung	/ V	1,5
Ladezyklen		> 6000
Monatliche Selbstentladung	/ %	
Max. Entladestrom		≤ 8 C
Energiedichte	/ Wh/kg	90

Tabelle 9: Kennwerte einer Super Charge Ion Battery, Quelle: Schulz (2014), S. 85.

Weil gerade das Thema Energiedichte zur Zeit eines der großen mitentscheidenden Themen bei der Akkumulatoren-Auswahl ist und man großes Entwicklungspotential in titanbasierenden Technologien sieht, wird an der Weiterentwicklung permanent gearbeitet. Ähnlich verhält es sich auch bei den drei folgenden Systemen – man ist vom Potential überzeugt und bereit die Forschung und (Weiter)Entwicklung zu forcieren. Obwohl für derzeitige Anwendung in KNAPP AG Anlagen sich in Entwicklung befindliche Systeme nicht in Frage kommen, um zukünftige Möglichkeiten aufzuzeigen, wird nachfolgend kurz auf diese eingegangen.

6.1.6 Der Lithium-Sulfat-Akkumulator (LSP)

Speziell ein chinesischer Hersteller wirbt seit geraumer Zeit mit Lithium-Sulfat-Systemen, obwohl diese tatsächlich noch nicht verfügbar sind.

Dennoch sind wenige Eigenschaften bekannt:

Zellenspannung	/ V	2,3
Min. Zellenentladespannung	/ V	1,0
Ladezyklen		> 2000
Monatliche Selbstentladung	/ %	
Max. Entladestrom		≤ 3 C
Energiedichte	/ Wh/kg	190

Tabelle 10: Kennwerte des Lithium-Sulfat-Akkumulators, Quelle: Schulz (2014), S. 86.

6.1.7 Der Lithium-Schwefel-Akkumulator (Li-S)

Bezüglich Fortschritt verhält es sich auch hier nicht anders, als bei der zuvor erwähnten Technologie. Zusätzlich zu den angeführten technischen Kennwerten ist bekannt, dass die Anode entweder aus metallischem Lithium, oder, bei weiterentwickelten Varianten, aus einer Siliziumlegierung besteht. Für die Kathode wird Schwefel in Verbindung mit Kohlenstoff eingesetzt. Die große erwartete Stärke liegt in der hohen Energiedichte und der dadurch geringen Masse dieser Akkumulatoren. Der Wert von 350 Wh/kg wurde in Prototypen bereits erreicht, man ist aber davon überzeugt diesen Wert bei ausgereiften Systemen beinahe verdoppeln zu können.⁵⁵

Derzeit wird der Schwerpunkt auf Verbesserung der Zyklenzahl gelegt. 50 Zyklen sind unter realen Bedingungen erreichbar, eine Steigerung auf 2000 Zyklen gelang bis dato nur unter Laborbedingungen.

Zellenspannung	/ V	2,2
Min. Zellenentladespannung	/ V	
Ladezyklen		50-2000
Monatliche Selbstentladung	/ %	
Max. Entladestrom		
Energiedichte	/ Wh/kg	350

Tabelle 11: Kennwerte des Lithium-Schwefel-Akkumulators, Quelle: Schulz (2014), S. 87.

⁵⁵ Vgl. Schulz (2014), S. 86.

6.1.8 Der Lithium-Luft-Akkumulator

Beim Lithium-Luft-Akkumulator spricht man definitiv noch von einer Vision und einer Technologie, wo sich nur vermuten lässt, welche Möglichkeiten sich ergeben könnten. Diverse Ansätze lassen erahnen, dass sich die Zellenspannung bei rund 2,9 V bewegen wird und man mit Energiedichtewerten an die 11000 Wh/kg rechnen darf. Das wäre enorm hoch und würde unter anderem den E-Mobilitätsmarkt revolutionieren.

Zellenspannung	/ V	2,9
Min. Zellenentladespannung	/ V	
Ladezyklen		
Monatliche Selbstentladung	/ %	
Max. Entladestrom		
Energiedichte	/ Wh/kg	11000

Tabelle 12: Kennwerte des Lithium-Luft-Akkumulators, Quelle: Schulz (2014), S. 87.

6.1.9 Der Lithium-Polymer-Akkumulator (LiPo)

Ein weiteres System der Lithiumionentechnologie ist der Lithium-Polymer-Akkumulator, welcher sich durch seine flexible Formgebung und die gute Verträglichkeit von hohen Strömen auszeichnet. Vor allem im Modellbau hat er beinahe die alleinige Vorherrschaft. Dafür werden in anderen alltäglichen Anwendungen wie zum Beispiel bei Mobiltelefonen oder Laptops kaum noch Lithium-Polymer-Akkumulatoren eingesetzt, weil diese teurer als herkömmliche Lithiumionenakkumulatoren sind und die hohen Ströme bei diesen Anwendungen nicht von Bedeutung sind.⁵⁶

Ermöglicht wird die gute Formgebung des Lithium-Polymer-Akkumulators vor allem durch die Schichtbauweise. Als Anode wird Kohlenstoff oder Grafit verwendet, als Kathode Lithium-Übergangsmetalloxid oder Lithium-Übergangs-Phosphat. Für beide Elektroden gilt, dass diese als Folien ausgeführt werden. Der Elektrolyt ist fest und besteht aus gleichartig verketteten Molekülen, dem sogenannten Polymer, und bildet eine Polymermatrix, die nicht ausrinnen kann. Das unterscheidet ihn vom herkömmlichen Lithium-Ionen-Akkumulator, dessen Elektrolyt flüssig ist.⁵⁷

⁵⁶ Vgl. Schulz (2014), S. 88.

⁵⁷ Vgl. Schulz (2014), S. 90 f.

Zellenspannung	/ V	3,7
Min. Zellenentladespannung	/ V	3,0
Ladezyklen		300-500
Monatliche Selbstentladung	/ %	~6
Max. Entladestrom		≤ 50 C
Energiedichte	/ Wh/kg	140-180

Tabelle 13: Kennwerte des Lithium-Polymer-Akkumulators, Quelle: Schulz (2014), S. 91 (erweitert).

Als nennenswerte große Schwäche dieser Systeme ist die Empfindlichkeit gegenüber Tiefentladungen zu erwähnen, die sowohl die Akkumulator-Kapazität in kürzester Zeit auf rund 50 % der Nennkapazität und weniger reduzieren kann, als auch in weiterer Folge die Lebensdauer drastisch verkürzen würde.⁵⁸

Resultierend aus den vorangegangenen Systemen ergibt sich daraus somit eine Gegenüberstellung bekannter Kennwerte:

	Li-Ion	Li-Mn	LFP	LTO	SCiB	LSP	Li-S	Li-Luft	LiPo	
Zellenspg.	/ V	3,6	3,7- 3,8	3,0- 3,3	2,0- 2,5	2,3	2,3	2,2	2,9	3,7
Min. Zellenentladespg.	/ V	2,5	2,5	~2,75	~2,75	1,5	1,0			3,0
Ladezyklen		200- 500	> 1000	> 5000	10000- 20000	> 6000	> 2000	50- 2000		300- 500
Monatliche Selbstentladung / %		5-8	~5	3-5	~3					~6
Max. Entladestrom		≤ 12 C		≤ 40 C	≤ 50 C	≤ 8 C	≤ 3 C			≤ 50 C
Energiedichte	/ Wh/kg	110- 1190	110- 120	110- 120	70- 90	90	190	350	11000	140- 180

Tabelle 14: Übersicht der Kennwerte von Lithiumsystemen, Quelle: Eigene Darstellung basierend auf Tabellen 5 bis 13.

Neben der oben angeführten Energiedichtewerte ist auch erwähnenswert, dass heute bereits tatsächlich bis zu 640 Wh/L realisiert werden können.⁵⁹

⁵⁸ Vgl. Schulz (2014), S. 95.

⁵⁹ Vgl. Reddy (Hrsg.) (2014), S. 26.2.

6.2 Laden von Lithiumionensystemen

Zu den großen Schwächen, die in manchen Fällen auch zu gefährlichen Zuständen führen können, der Lithiumionensysteme zählt ihre Empfindlichkeit gegenüber Überladungen. Diese können durch Nebenreaktionen zur Zersetzung des Elektrolyten führen. Deswegen empfiehlt sich ein CC-CV Ladeverfahren mit Überwachung der Spannung und gegebenenfalls zu erfolgreicher Abschaltung. Zusätzlich ist es notwendig und dient zugleich der Fehlererkennung, tiefentladene Zellen einer Vorladephase zu unterziehen. Dabei wird anfangs mit einem sehr kleinen Strom geladen, bis die Zellenspannung etwa 3 V beträgt. Diese Vorgehensweise ermöglicht es einerseits einen Kurzschluss innerhalb einer Zelle zu erkennen, weil in diesem Fall die 3 V Grenze nicht erreicht werden würde. Andererseits würden Zellen, die durch Tiefentladung ausgefallen sind, bei Laden mit hohen Strömen zwar wieder aufgeladen, jedoch würden auftretende Kurzschlüsse im Inneren der Zelle zu starker Wärmeentwicklung oder sogar bis hin zu thermischer Zerstörung führen.⁶⁰

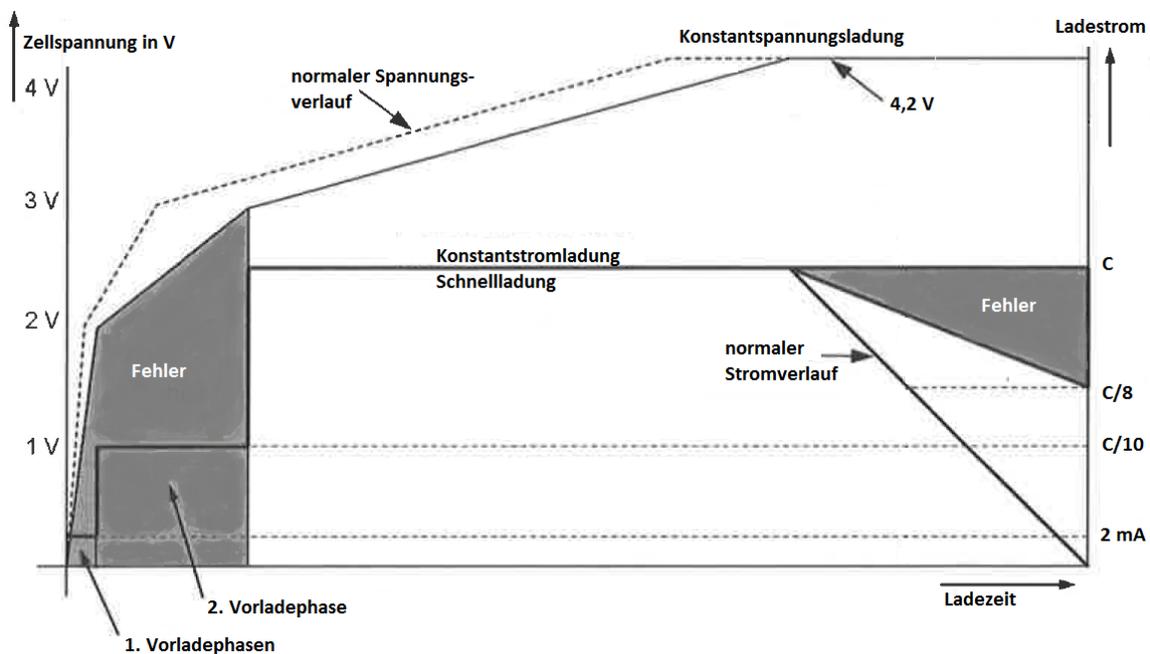


Abbildung 25: Typischer Ladeverlauf eines Lithiumionensystems mit Vorladephasen, Quelle: Jossen/Weydanz (2006), S. 194 (leicht modifiziert).

Außerdem ist es bei Lithiumsystemen nicht üblich den Vollladezustand durch die Erhaltungsladung durchzuführen, weil sich diese schlecht auf die Alterung auswirken würde. Man toleriert in diesem Fall einen Spannungsrückgang auf ein definiertes Level und führt bei Unterschreiten von diesem eine Standard CC-CV Ladung durch. Im Normalfall passiert das bei einer Restladungsmenge von etwa 75 % bis 80 %.⁶¹

⁶⁰ Vgl. Jossen/Weydanz (2006), S. 195.

⁶¹ Vgl. Jossen/Weydanz (2006), S. 199.

6.3 Entladen von Lithiumsystemen

Zu den großen Vorteilen und Stärken der Lithiumionentechnologien zählt der große Entladestrom. Dieser kann, wie auch Tabelle 14 zu entnehmen, bis zu 50 C betragen, und das bei einer Entladetiefe von bis zu DoD = 80 %. Das bedeutet zwar, dass beinahe über die volle Kapazität theoretisch die volle Leistung zur Verfügung steht, jedoch ist es in der Realität so, dass die Kapazität mit zunehmendem Entladestrom und sinkenden Temperaturen verringert wird. Das hängt unter anderem mit der Veränderung des Innenwiderstandes zusammen, der mit sinkender Temperatur zunimmt.⁶²

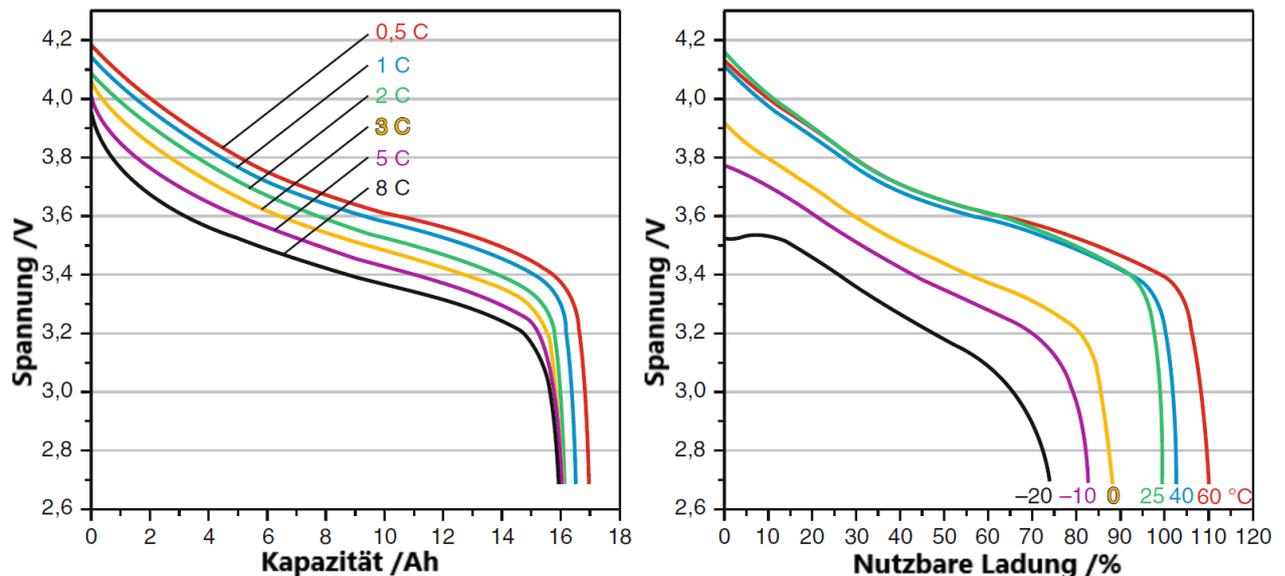


Abbildung 26: Entladekurve eines 17 Ah, 3,7 V Lithiumakkumulators in Abhängigkeit der C-Rate (li.) und bei 0,5 C in Abhängigkeit der Temperatur (re.), Quelle: Kurzweil/Dietlmeier (2015), S. 225 (leicht modifiziert).

Der Memory Effekt ist bei Lithiumionenakkumulatoren nicht von Bedeutung und hat keinen relevanten Einfluss auf das Verhalten von Lithiumionensystemen.⁶³

6.4 Sicherheit und Handhabung von Lithiumionensystemen

Auch wenn diese Systeme durch den ein oder anderen Vorfall den Ruf haben sicherheitstechnisch als eher kritisch angesehen zu werden, kann man durch ein paar Faktoren das Risiko enorm mindern und auch Lithiumionensysteme sicher verwenden.

Zu den entscheidenden Punkten, die zu beachten sind zählen:⁶⁴

- Chemische Sicherheit;
- Elektrische Sicherheit;
- Mechanische Sicherheit;
- Funktionelle Sicherheit;

⁶² Vgl. Kurzweil/Dietlmeier (2015), S. 224.

⁶³ Vgl. Schulz (2014), S. 76.

⁶⁴ Vgl. Korthauer (Hrsg.) (2013), S. 16.

Selbstverständlich liegt es bereits am Hersteller entsprechenden Gefahren entgegenzuwirken. Aber auch der Endverbraucher kann und muss hier bei der Planung und Auslegung die Betriebsbedingungen berücksichtigen. Während chemische und elektrische Sicherheit von diesem nicht mehr beeinflusst werden können, sind die mechanische Beanspruchung und die funktionelle Sicherheit sehr wohl in der Hand des Planers. Es sollte eine möglichst robuste Konstruktion das Akkumulator-System schützen und zugleich durch korrekte Lade- und Entladevorgänge die funktionelle Sicherheit gewährleistet und optimiert werden. Das bedeutet zugleich auch eine Verlängerung der Lebensdauer. Damit soll dem Risiko von gefahrbringenden, chemischen Reaktionen vorgebeugt werden.

Wichtig:⁶⁵ Die Lagerung von entladenen Lithiumionenakkumulatoren ist nicht erlaubt! Um unter anderem den Grad der Selbstentladung möglichst zu minimieren, empfiehlt sich das Lagern bei etwa 50 % bis 80 % der Nennkapazität. Auch eine niedrige Temperatur von nur wenigen Plusgraden ist für die Lagerung zulässig und optimal. So kann die Selbstentladung auf bis zu etwa 1 % reduziert werden. Nebenbei wirkt sich eine korrekte Lagerung auch auf die Alterung positiv aus.

6.5 Nachhaltigkeit und Kosten

Es ist im Sinne von Umwelt und Verbraucher, die Lebensdauer der Akkumulatoren optimal auszuschöpfen. Dadurch spart man einerseits Kosten, zugleich wird damit der Herstellungsbedarf, Rohstoffbedarf und nach Ablauf der Nutzungsdauer die Entsorgung verringert und möglichst umweltfreundlich gestaltet. Unter anderem von sogenannten Batterie-Management-Systemen wird die Aufgabe wahrgenommen durch permanente, kontinuierliche Überwachung die Zellen gemäß ihren Betriebskriterien zu betreiben. Dafür sind folgende Anforderungen zu beherrschen:⁶⁶

- Lade- und Entladegrenzen müssen eingehalten werden können.
- Zellspannungen und Temperaturen sind einzeln zu kontrollieren.
- Balancing zwischen den einzelnen Zellen muss praktiziert werden.
- Abschaltgrenzen müssen beherrscht werden.

⁶⁵ Vgl. Schulz (2014), S. 79.

⁶⁶ Vgl. Kurzweil/Dietlmeier (2015), S. 240.

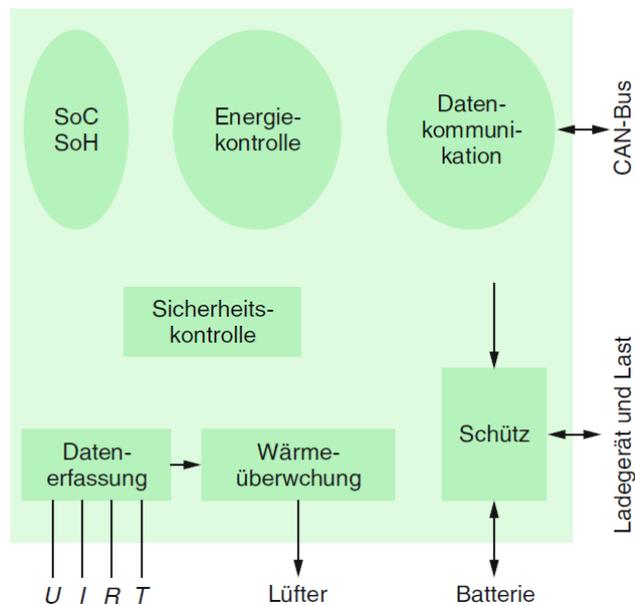


Abbildung 27: Prinzipschema eines Batterie-Management-Systems, Quelle: Kurzweil/Dietlmeier (2015), S. 238.

Begriffserklärung zu Abbildung 27 und Abbildung 28:

$$\text{SoC (Ladezustand, State of Charge)} = \frac{\text{momentanter Ladezustand } Q(t)}{\text{Kapazität der neuen Batterie } Q_0} \quad (6.1)$$

$$\text{SoH (Alterungszustand, State of Health)} = \frac{\text{verfügbare Kapazität } Q_0(t)}{\text{Kapazität der neuen Batterie } Q_0} \quad (6.2)$$

SoF (Funktionalität, State of Function)

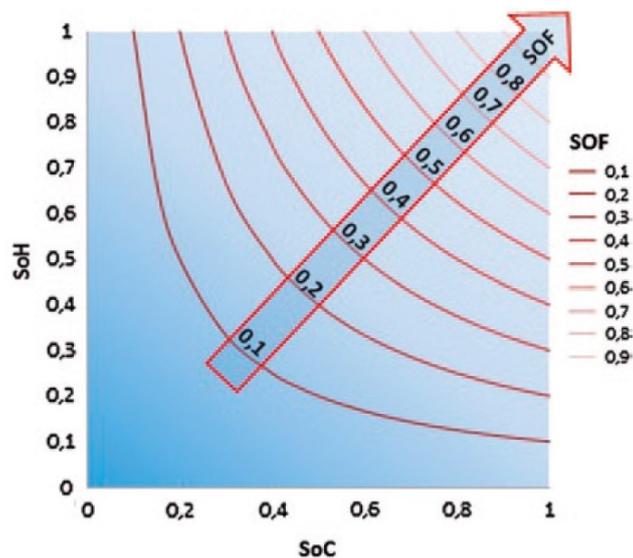


Abbildung 28: Zusammenhang von SOC, SOH und SOF, Quelle: Korthauer (Hrsg.) (2013), S. 178.

6.5.1 Balancing von Zellen

Darunter versteht man den Ladungsausgleich zwischen mehreren, seriell oder parallel, geschalteten Zellen. Das ist von Bedeutung, weil die Gesamtkapazität von der am niedrigsten geladenen Zelle bestimmt wird und im Gegenzug beim Aufladen jene Zelle die als erste vollständig geladen ist, die Abschaltung und somit auch die Beendigung des Ladevorganges einleitet. Bei Erreichen der gleichen Leerlaufspannungen

der einzelnen Zellen, spricht man von *ausbalanciert*. Diese Aufgabe wird ebenfalls vom Batterie-Management-System erfüllt und erhöht den Wirkungsgrad und die Lebensdauer des Akkumulators.⁶⁷

6.5.2 Kosten und Marktentwicklung

Grundsätzlich sind Lithiumionensysteme teurer als Bleisysteme.

Der Preis setzt sich zu etwa 40 % aus Kosten für Materialien und 60 % verbleibender Kosten für restliche Zellenbauteile zusammen. Dieses Verhältnis spielt bei der Technologiewahl insofern eine Rolle, weil die Materialien sich in Masse und Volumen bemerkbar machen. So kann man typischerweise davon ausgehen, dass der größte Anteil der Masse auf das Material der Kathode (zirka 27 %) zurückzuführen ist und den maßgebendsten Anteil am Volumen der Elektrolyt (zirka 32 %) hat. In absehbarer Zeit sollte sich der Preis von Lithiumionensystemen von etwa 600 €/kWh auf ungefähr 200 €/kWh senken.⁶⁸

Erwähnenswert ist die Entwicklung vergangener Jahre und die prognostizierte Entwicklung in naher Zukunft:⁶⁹ Im Jahr 2011 wurde Anodenmaterial im Wert von 600 Mio. US-\$ produziert, Kathodenmaterial hatte im selben Jahr ein Volumen von 1800 Mio. US-\$ und ein Wachstum von 13 %. Der Wert von produziertem Elektrolyt betrug 400 Mio. US-\$ bei einem Zuwachs von 16 %. Allein am europäischen Markt umfasste das Marktvolumen im darauffolgenden Jahr 748,2 Mio. US-\$, welches 2017 auf bereits 1640 Mio. US-\$ steigen soll.

6.5.3 Nachhaltigkeit von Lithiumsystemen

Dank der verfügbaren Kapazität von geschätzten 46 Mio. t sollte genug Lithium vorhanden sein, um auch den erwarteten Bedarfszuwachs, unter anderem wegen der Marktentwicklung bedingt durch die zunehmende Nachfrage von Elektrofahrzeugen, abzudecken. Die wichtigsten Rohstoffstätten befinden sich in Teilen Südamerikas, Chinas, Australiens, Nordamerikas und Kanadas sowie Simbabwe. Rein hypothetisch betrachtet würden zusätzlich aus Meerwasser rund $230 \cdot 10^9$ t gewonnen werden können! Dieses enthält 0,14 mg bis 0,25 mg Lithium pro Liter.⁷⁰

Durch unterschiedliche Prozesse ist es möglich, die chemischen Rohstoffe und die enthaltenen Salze durch Schmelzbehandlungen oder metallurgische Prozesse aufzubereiten, wiederzugewinnen und wieder zu verwenden beziehungsweise als Brennstoffe einzusetzen. Man kann Lithiumionensystemen eine gute Umweltverträglichkeit attestieren.

Aus der Herstellung der Batterien und Akkumulatoren ergeben sich CO₂ Äquivalente von 0,20 kg/Wh bis 0,25 kg/Wh.⁷¹

⁶⁷ Vgl. Kurzweil/Dietlmeier (2015), S. 241.

⁶⁸ Vgl. Kurzweil/Dietlmeier (2015), S. 243.

⁶⁹ Vgl. Kurzweil/Dietlmeier (2015), S. 243 ff.

⁷⁰ Vgl. Kurzweil/Dietlmeier (2015), S. 246.

⁷¹ Vgl. Kurzweil/Dietlmeier (2015), S. 249.

7 DER DOPPELSCHICHTKONDENSATOR

Beim Doppelschichtkondensator handelt es sich um einen Bauteil, der sozusagen das Bindeglied zwischen Kondensator und Batterie bildet. Während bei einem Kondensator zwischen den Elektroden ein nichtleitendes Dielektrikum eingesetzt wird, verwendet man bei einem Doppelschichtkondensator anstelle dessen einen Elektrolyten.

„Sie nutzen die Speicherprinzipien von Kondensatoren und Batterien: 1. Die kapazitiven Ströme an der Grenzfläche zwischen einem porösen Elektrodenmaterial mit großer Oberfläche und einer angrenzenden Salzlösung und 2. Die faradayschen Ströme durch batterieähnliche Redoxreaktionen am Elektrodenmaterial, bei denen der fließende Strom mit einem chemischen Stoffzusatz gekoppelt ist.“⁷²

Dank dieser Technologie verbinden sich das Speicherprinzip des Kondensators und jenes der Batterie (siehe auch Kapitel 2.1). Daraus resultieren Eigenschaften, die jenen des Kondensators und der Batterie durchaus überlegen sind. So kann man zum einen die spezifische Energie von herkömmlichen Kondensatoren um ein Vielfaches übertreffen und zugleich durch sehr große Zyklenzahlen und hohe Leistungsdichten im Vergleich zu Batterien überzeugen.

Zusätzlich können die möglichen, geringen Lade- und Entladezeiten, von nur wenigen Sekunden, bei entsprechenden Anwendungsfällen nützlich sein.

	Doppelschichtkondensator	Batterie	herkömmlicher Kondensator
Zellenspg. / V	gering	moderat	hoch
Zyklenzahl	nahezu unbegrenzt	begrenzt: < 1000 bei Tiefentladung	hoch
Energiedichte / Wh/kg	moderat: ~5	hoch: 100-200	sehr gering
Monatliche Selbstentladung / %	moderat: ~15	gering: < 10	sehr gering

Tabelle 15: Vergleich von Doppelschichtkondensator, Batterie, Kondensator, Quelle: Kurzweil/Dietlmeier (2014), S. 28 (leicht modifiziert).

Weil sich im Grenzbereich von Elektrode und Elektrolyt negativ und positiv geladene Ladungsträger sehr nahe kommen, bildet sich an der großen, porösen Oberfläche der Aktivmasse, als Phasengrenze bezeichnet, die sogenannte *Helmholtz Doppelschicht*, welche nur 2 nm bis 5 nm dick ist. Daraus resultiert gemäß Formel 2.2 eine merkbare Kapazität, die jene von herkömmlichen Kondensatoren deutlich übertrifft.⁷³

⁷² Vgl. Kurzweil/Dietlmeier (2015), S. 26.

⁷³ Vgl. Tschöke (2014), S. 70.

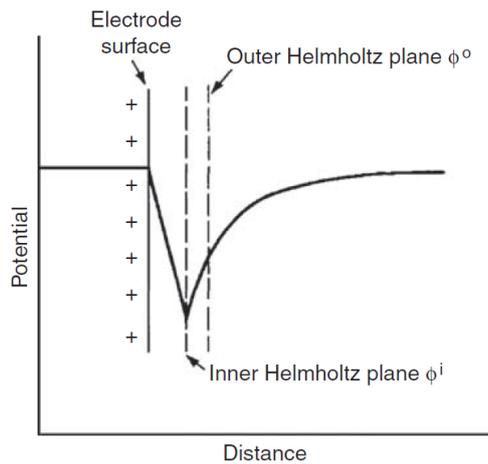


Abbildung 29: Potentialverteilung an einer positiv geladenen Elektrode, Quelle: Reddy (Hrsg.) (2014), S. 2.14.

Durch spezielle Technologien und Verfahren ist es möglich Elektrodenoberflächen von bis zu 3000 m²/g zu erreichen.⁷⁴

Grundsätzlich tritt diese Schicht auch in herkömmlichen Batterien und Akkumulatoren auf, wobei diese aber eine andere Form des Ladungs- und Energiespeicherungsprinzips nutzen. Erst Bauteile die die Energie nur durch Nutzung der Doppelschicht speichern, bezeichnet man als Doppelschichtkondensatoren.

Man unterscheidet zwischen Doppelschichtkondensatoren, welche wässrige Elektrolyte einsetzen und welche organische Elektrolyte verwenden. Des Weiteren gibt es noch Unterscheidungen zwischen reinen Doppelschichtkondensatoren und Hybriden. Je nachdem ergibt sich, bedingt durch die Zersetzungsspannung des Elektrolyten, mit wässrigem Elektrolyt eine maximale Spannung von rund 1,0 V, bei organischem sind etwa 3 V erreichbar. Zweite zeichnen sich auch durch die bessere Verträglichkeit tiefer Temperaturen aus.⁷⁵

Um höhere Spannungen zu erreichen, muss man entweder mehrere Zellen in Serie schalten, oder sogenannte *Stacks* – sprich Elektrodenstapel – bilden. Für beide Fälle gilt:

$$C = \left[\sum_{i=1}^n \frac{1}{C_i} \right]^{-1} \tag{7.1}$$

C/As	Gesamtkapazität
C_i/As	Kapazität einer Zelle
$n/1$	Anzahl der Zellen

⁷⁴ Vgl. Jossen/Weydanz (2006), S. 268.

⁷⁵ Vgl. Jossen/Weydanz (2006), S. 268.

7.1 Aufbau des Doppelschichtkondensators

Aufgrund der Präsenz am Markt und der großen Kommerzialisierung wird in diesem Kapitel nur auf Doppelschichtkondensatoren eingegangen, deren Elektroden auf Kohlenstoff basieren und die organische Elektrolyte einsetzen.

Der prinzipielle Aufbau von Doppelschichtkondensatoren setzt sich zusammen aus Elektroden, dazwischen liegend befindet sich ein in Elektrolyt getränkter Separator und um dieses Konstrukt wird das Gehäuse angebracht.

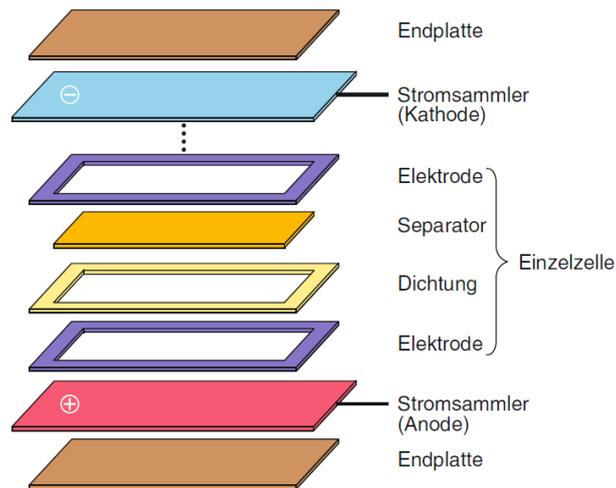


Abbildung 30: Typischer Aufbau eines Doppelschichtkondensators, Quelle: Kurzweil/Dietlmeier (2015), S. 33.

Gängige Bauformen sind zylindrisch oder prismatisch. Um die Oberfläche der Elektroden möglichst groß gestalten zu können, wird als Elektrodenmaterial oft Aktivkohle verwendet. Der meistverbreitete, organische Elektrolyt ist *Acetonitril* als Lösungsmittel in Verbindung mit *Tetraethylammoniumborofluorid*. Bei der Wahl vom Lösungsmittel sind Faktoren wie elektrische Leitfähigkeit, Spannungsstabilität, Temperaturverhalten und Umwelteinflüsse zu berücksichtigen. Für Acetonitril sprechen die gute elektrische Leitfähigkeit und hohe Temperaturstabilität. Denen gegenüber steht die Toxizität des selbigen. Mehr oder weniger umgekehrt verhält es sich beim alternativ verwendeten *Propylenkarbonat*.⁷⁶

⁷⁶ Vgl. Tschöke (2014), S. 69.

7.1.1 Ersatzschaltbild und elektrisches Verhalten

Der Doppelschichtkondensator verhält sich ähnlich wie ein Kondensator, weshalb es sich anbietet das Ersatzschaltbild eines Kondensators für weitere Erklärungen heranzuziehen. Dieses setzt sich zusammen aus:⁷⁷

- Der Kapazität C des Superkondensators;
- Dem Innenwiderstand R_S bedingt durch Elektroden und Elektrolyt;
- Einem Parallelwiderstand R_P , der für die Selbstentladung steht;
- Einer im Bereich von nH liegender vernachlässigbaren Induktivität L ;

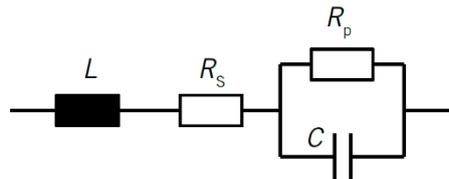


Abbildung 31: Vereinfachtes Ersatzschaltbild eines Superkondensators, Quelle: Tschöke (Hrsg.) (2014), S. 71.

Während zumindest Innenwiderstand und Kapazität meist fixer Bestandteil der Gerätedokumentation oder eines Datenblatts sind, kann es notwendig sein, zumindest den Selbstentladungswiderstand durch Messungen selbst zu ermitteln. Dazu bedarf es lediglich den Spannungsabfall nach erfolgter Ladung mit konstantem Strom zu beobachten, wobei man dabei Einflussfaktoren wie Temperatur und Ladedauer mitberücksichtigen muss. Tatsächlich zeichnet sich der Doppelschichtkondensator aber durch eine sehr geringe Selbstentladungsrate aus, weshalb der Parallelwiderstand nur als Notwendigkeit betrachtet werden kann um ein korrektes Ersatzschaltbild erstellen zu können.⁷⁸

7.1.1.1 Einfluss der Spannung auf die Kapazität

Ein weiterer Vorteil des Superkondensators ist, dass es dank eines annähernd linear steigenden, bei Aufladen, beziehungsweise sinkenden Spannungsverlaufs bei Entladung möglich ist, anhand der Spannung auf den Ladezustand schließen zu können.

⁷⁷ Vgl. Tschöke (2014), S. 71.

⁷⁸ Vgl. Tschöke (2014), S. 71.

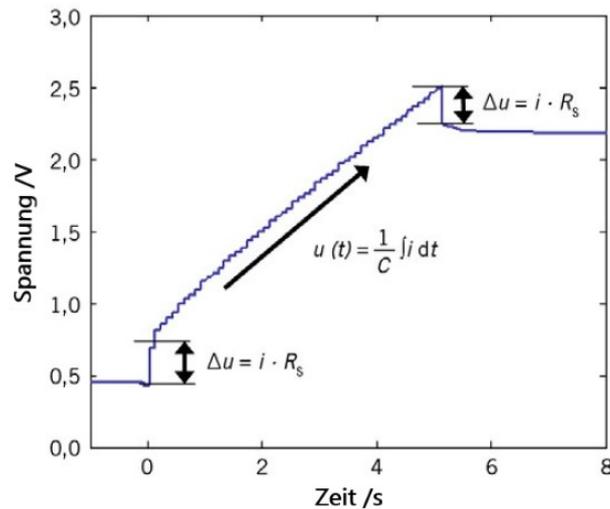


Abbildung 32: Spannungsverlauf bei Konstantstromladung, Quelle: Tschöke (Hrsg.) (2014), S. 71 (leicht modifiziert).

Mit Anwendung der Geradengleichung bedeutet dies näherungsweise, weil hierbei die faradayschen Vorgänge nicht berücksichtigt werden, dass gilt:

$$C(U) = C_0 + kU \quad (7.2)$$

- C_0/As Doppelschichtanteil der Kapazität
- $C(U)/\text{As}$ Kapazität in Abhängigkeit der Spannung
- U/V angelegte Spannung

7.1.1.2 Temperatureinfluss auf die Kapazität

Die Temperatur hat großen Einfluss auf den Elektrolyten und in weiterer Folge auf dessen Leitfähigkeit. Das macht sich wiederum in Form einer Veränderung des Innenwiderstandes bemerkbar. Dieser nimmt mit sinkenden Temperaturen stark zu und kann zum Beispiel im Vergleich von Raumtemperatur und -30 °C durchaus um Faktor 7 größer sein.⁷⁹

Zugleich sinkt mit der Temperatur auch die Kapazität der Doppelschicht. Diese hängt von der dielektrischen Leitfähigkeit, auch als *Permittivität* bezeichnet, ab. Umso schwerer es für die Ladungsträger ist in die Poren der Elektroden vorzuschreiten, desto niedriger wird die Kapazität. Zudem nimmt auch nach dem arrheniusschem Gesetz die Reaktionsgeschwindigkeit mit sinkender Temperatur ab.⁸⁰

Unter Berücksichtigung des Temperatureinflusses gilt somit in angenäherter Form:

$$C(U) = C_N(1 + a_1U + a_2U)(1 + b\Delta T) \quad (7.3)$$

- C_0/As Doppelschichtanteil der Kapazität
- $C(U)/\text{As}$ Kapazität in Abhängigkeit der Spannung
- U/V angelegte Spannung

⁷⁹ Vgl. Kurzweil/Dietlmeier (2015), S. 126.

⁸⁰ Vgl. Kurzweil/Dietlmeier (2015), S. 126.

7.2 Lebensdauer und Alterung

Durch den Einsatz des Elektrolyten beim Doppelschichtkondensator sind auch die gleichen Einflussfaktoren wie bei Batterien und Akkumulatoren für die Alterung von Superkondensatoren von Bedeutung. Dazu zählt vorrangig die Temperatur, aber auch die Spannung und der Strom haben ihren Anteil am Verlauf der Lebensdauer. Deswegen sollte beim Betrieb unbedingt auf die höchstzulässigen Temperatur- und Spannungswerte geachtet werden. Die Konsequenzen von Abweichungen kann man grob abschätzen:⁸¹ 10 K Temperaturerhöhung und eine Erhöhung der Spannung von 100 mV halbieren die Lebensdauer und mindern die Leistungsfähigkeit.

Dass es sich hierbei wirklich nur um eine Faustformel handelt, bestätigt die nachfolgende Abbildung. Diese verdeutlichen zudem, dass die Temperatur wesentlich größeren Anteil am Alterungsprozess hat, als die Spannung.

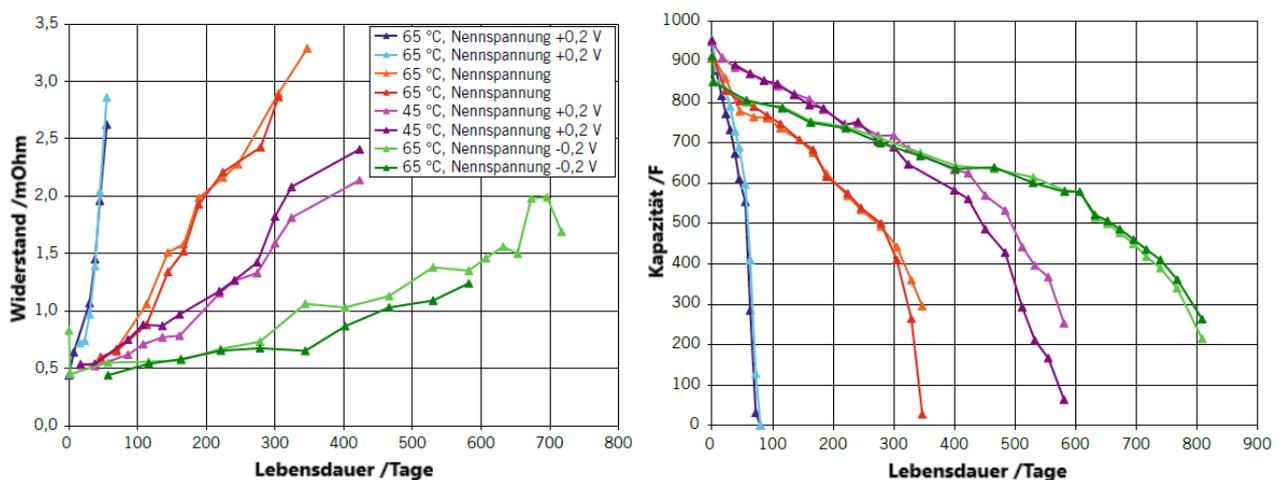


Abbildung 33: Widerstands- und Kapazitätsentwicklung von Doppelschichtkondensatoren, Quelle: Tschöke (Hrsg.) (2014), S. 73 (leicht modifiziert).

Sofern man sich an die Herstellerangaben hält, überzeugen Doppelschichtkondensatoren durch die Möglichkeit eine beinahe grenzenlose Anzahl von Lade- und Entladevorgängen, auch bei tiefen Temperaturen und nach Tiefentladung, problemlos zu vertragen. Irreversible Nebenreaktionen und Phasenveränderungen, wie man sie bei Batterien feststellt, treten nicht auf.⁸²

7.3 Sicherheit, Nachhaltigkeit, Kosten

Der Doppelschichtkondensator ist ein recht unempfindlicher Bauteil und kann überhöhte Temperaturen und Spannungen, sowie anspruchsvolle Umgebungsbedingungen gut bestehen. Es wird sich zwar der Elektrolyt ausdehnen, sollte der Druck jedoch zu groß werden, wird dieser über ein Ventil abgelassen, sofern ein solches vorhanden ist. Wenn dieses fehlt, kann es zu Beschädigung des Bauteils kommen. Sollte der Kondensator einem Feuer ausgesetzt sein und sich dadurch erhitzen, würde ebenso das Sicherheitsventil öffnen und den Austritt des Elektrolyten bewirken. Obwohl vor allem bei organischen

⁸¹ Vgl. Tschöke (2014), S. 72.

⁸² Vgl. Kurzweil/Dietmeier (2014), S. 128.

Anwendungen dieser giftig ist, ist durch die geringe Dosis in der unmittelbaren Umgebung nicht von gesundheitsgefährdenden Umständen auszugehen.

Zusätzlich kann der Ladevorgang ohne eigens dafür entwickelte Ladegeräte mit Überwachungssystemen erfolgen. Einzig zwischen einzelnen Zellen, sofern mehrere in Serie verschaltet sind, auf eine Balancierung zu achten empfiehlt sich. Das ist auch deswegen zu beachten, weil die Herstellertoleranzen, die Kapazität betreffend, mit etwa 5 % doch recht groß sind und sich das vor allem bei Serienschaltung mehrerer Zellen in statistischen Abweichungen von bis zu 15 % niederschlägt. Dazu werden unterschiedliche Methoden, wie der Einsatz von Überbrückungswiderständen und Überbrückungsdioden, praktiziert.⁸³

Noch ist der Doppelschichtkondensator vergleichsweise selten im Einsatz. Sogar eine Vorschau von *Transparency Market Research (USA)* ordnet Doppelschichtkondensatoren für das Jahr 2020 einen sehr geringen Marktanteil von nur 5 % zu. Jedoch könnten grüne Energien diesen Wert mittelfristig aufbessern. Mit steigender Nachfrage sollte sich der Preis auf etwa 0,06 €/F, 60 €/Wh und 25 €/kW senken.⁸⁴

Die bevorzugten und notwendigen Rohstoffe wie Kohlenstoff oder Polymere sind teilweise recht günstig verfügbar und produzierbar. Nachdem ein Doppelschichtkondensator ausscheidet, können seine Bestandteile und Materialien gut aufbereitet und wiederverwendet werden. Auch der Energieaufwand für die Herstellung ist vergleichsweise niedrig, vor allem wenn man in Betracht zieht, wie langlebig diese Technologie ist. Summa summarum kann man beim Doppelschichtkondensator insofern also von einer recht nachhaltigen Technologie sprechen.

Auch die Tatsache, dass Superkondensatoren, unter anderem wegen der guten Diagnostizierbarkeit, bereits in der Branche von Elektrofahrzeugen und sogar Flugzeugen Fuß gefasst haben, spricht für die Technologiereife.

⁸³ Vgl. Kurzweil/Dietlmeier (2014), S. 149.

⁸⁴ Vgl. Kurzweil/Dietlmeier (2014), S. 149 f.

8 SWOT ANALYSE

Innovationen und Weiterentwicklungen erfordern immer ein gewisses Budget und bergen in den meisten Fällen auch ein entsprechendes Risiko. KNAPP AG betrachtet es als Notwendigkeit, allein schon des Verantwortungsbewusstseins wegen, zuvor diese Kosten und Risiken einzuschätzen und abzuwägen welche Möglichkeiten und Chancen diesen gegenüberstehen. Anhand einer *SWOT Analyse* (Strengths – Weaknesses – Opportunities – Threats) sollen prognostizierte Risiken und offensichtliche Schwächen den erhofften möglichen Chancen und bekannten Stärken einer Umstellung des Energieversorgungskonzepts gegenübergestellt werden.

Diese Analyse soll dazu dienen strategische Entscheidungen, ob man den Schritt, das Energieversorgungskonzept tatsächlich zu überarbeiten und auf eine OnBoard Versorgung zu setzen, bereit ist zu gehen, zu treffen.

Stärken: Die Montage kann zur Gänze bereits in der Produktion stattfinden, auf den zu installierenden Anlagen ist es nur noch notwendig das betroffene Fördermittel im Sinne einer Plug and Play Anwendung einzubringen und in Betrieb zu nehmen. Ein Austausch eines defekten Transportmittels kann mehr oder weniger im Betrieb und ohne großen Aufwand erfolgen. Die notwendigen Sicherheitsmaßnahmen und Vorkehrungen müssen dabei dennoch beachtet werden.

Zusätzlich entfallen verschleißbehaftete Bauteile, wie zum Beispiel Schleppkettenführungen und Schleifkontakte.

Schwächen: Die starke Abhängigkeit der Zuverlässigkeit von der Stabilität der Netzversorgung kann zu Problemen, die Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit betreffend, führen. Der Nutzungsgrad von Energiespeichersystemen hängt stark von den Betriebsbedingungen ab.

Das bestehende Not-Halt-Konzept muss angepasst werden. Geeignete, drahtlose Systeme sind zusätzlich zu erheben und die Implementierung dieser zu entwickeln.

Chancen: Man kann Kosten vor Ort einsparen, weil der Einsatz von Elektrofachkräften für die aufwendige Installation bis dato erforderlicher Verkabelungssysteme reduziert werden kann. Es wird mehr Personal in der Fertigung und im Zusammenbau im Stammhaus benötigt, beziehungsweise es wird etwas mehr Zeit dafür beansprucht.

Durch die Unabhängigkeit von Beanspruchungsgrenzen, Montagevorgaben und Leitungsverlusten können neue Ausdehnungsdimensionen der Läger ins Auge gefasst werden. Durch modulare Bauweise wären erforderliche, zusätzliche Ladepunkte denkbar.

Risiken: Unterschiedlichste, kundenorientierte Anwendungsszenarien machen eine Standardisierung schwierig. Weil diese aber für den Prozess unumgänglich ist, besteht die Möglichkeit, dass die montierten Energiespeicher nicht immer optimal betrieben werden können und deswegen im schlimmsten Fall auch frühzeitig getauscht werden müssen. Das kann zu Zusatzkosten und Kundenunzufriedenheit führen.

9 ANFORDERUNGEN AN KNAPP AG SYSTEME

9.1 Anforderungen und Umgebungsbedingungen

Nachdem in den vorangegangenen Kapiteln grundlegende Informationen zu den zu untersuchenden Technologien ausführlich erläutert wurden, gilt es in weiterer Folge deren Einsatzmöglichkeiten anhand der erwähnten Komponenten OSR Shuttle™ und OSR Lift zu überprüfen und gegebenenfalls auch möglichst detailliert zu definieren.

Weil beide Komponenten direkt aneinander angebaut sind, wie in Abbildung 2 ersichtlich, und nur gemeinsam den Behälterfluss sicherstellen, gibt es einige gemeinsame Anforderungen und Bedingungen. Dazu zählen vor allem die Umgebungsbedingungen innerhalb eines Logistikzentrums, das Betriebsmodell und die Erwartungen an die Verfügbarkeit, sowie der erreichbare Behälterdurchsatz.

9.1.1 Behälterdurchsatz

Dieser definiert die Anzahl von Transportbehältnissen, die in einer festgelegten Zeit manipuliert werden können. Aktuelle Werte liegen hier in etwa bei 25 Behältern die stündlich je Ebene ausgeschleust oder eingelagert werden können. Das bedeutet zugleich, es kann bis zu 25 mal pro Stunde zu einem Aufladevorgang des Energiespeichers kommen. Unter Berücksichtigung des Schichtbetriebes ergibt sich somit eine maximale Zyklenzahl von:

$$25 \text{ (Behälter/Stunden)} * 16 \text{ (Arbeitsstunden/Tag)} = 400 \text{ (Ladezyklen/Tag)} = 100000 \text{ (Ladezyklen/Jahr)}$$

Beim Lift wird eine 100 %ige Auslastung gefordert. Das bedeutet, dass nur während der Zeit einer Behälterübergabe die Möglichkeit des Aufladens eines Energiespeichers besteht. Die Begründung dieser Festlegung liegt daran, dass der Lift alle Ebenen bedienen können muss und somit einem Vielfachen an OSR Shuttles™ gegenüberstehen kann.

Der erreichbare Behälterdurchsatz ist letztendlich der wichtigste Wert, den es zu erfüllen gilt und hat selbstverständlich großen Einfluss auf das Verhältnis von notwendigem Betrieb zu zulässiger Stillstandsdauer, welche für weitere Untersuchungen als Ladedauer berücksichtigt wird.

9.1.2 Temperatur und Luftfeuchtigkeit

Wie bereits im Vorfeld dargelegt, ist vor allem die Temperatur eine sehr entscheidende Einflussgröße beim Einsatz von elektrochemischen Speichern. Um eine flächendeckende Lösung erarbeiten zu können, wird diese gemäß den standardmäßigen KNAPP AG Vorgaben definiert. Somit gilt:

Es ist eine Umgebungstemperatur von +5 °C bis +40 °C in Anlehnung an die EN 60204-1 zulässig. Bei 40 °C darf die Luftfeuchtigkeit 50 % betragen, bei 20 °C sind es 90 %. KNAPP AG Anlagen sind für den Betrieb bis zu einer Seehöhe von 1000 m ausgelegt.

9.1.3 Schichtmodell und Verfügbarkeit

Das KNAPP AG Schichtmodell sieht einen zweischichtigen Betrieb vor, wobei jede Schicht mit acht Arbeitsstunden angedacht ist und die beiden Einheiten nahtlos aneinander anknüpfen. Es ist von einer

Fünftagewoche auszugehen. Abzüglich der Feiertage rechnet man bei KNAPP AG mit 250 Arbeitstagen jährlich.

9.1.4 Abmessungen und Zusatzmasse

Weil sowohl das OSR Shuttle™ als auch der dazugehörige Lift in ein Regal integriert werden müssen, sind durch die Mechanik Grenzen gesetzt, beziehungsweise ist ein Aufwand konstruktive Änderungen am Regal vornehmen zu müssen, zu vermeiden. Deswegen ist zu beachten, dass weder das OSR Shuttle™ noch die Liftplattform die Hauptabmessungen und die Eigenmasse massiv verändern dürfen.

Das bedeutet des Weiteren, dass in Anbetracht von Energie- und Leistungsdichte somit durch genau diese Einschränkungen zugleich die höchstmögliche Kapazität, die installiert werden kann, begrenzt wird.

9.2 Bewertung der Energiespeicher unter Berücksichtigung der Anforderungen

Bevor weitere Schritte in der Erarbeitung eines Energiespeicherkonzepts getätigt werden, sollen die einzelnen Technologien unter Berücksichtigung der KNAPP AG Anforderungen bewertet werden. Hierfür eignet sich eine Nutzwertanalyse hervorragend. Durch die Gegenüberstellung von Technologieeigenschaften, den Anforderungen und die Gewichtung einzelner Ansprüche kann sich die eine oder andere Technologie bereits im Vorfeld als ungeeignet herausstellen.

Zur Vergabe der Wichtigkeit sind für das bessere Verständnis und für auf diese Masterarbeit aufbauende Abstimmungsgespräche über zukünftige Vorgehensweisen ein paar Erklärungen notwendig:

- Die Zyklenzahl ist jener Wert, der schlussendlich für die Verfügbarkeit und die Wartungsintervalle von Anlagen relevant ist. Umso geringer die Zyklenzahl, desto häufiger muss der betroffene Energiespeicher getauscht werden. Während des Austausches steht somit ein Anlagenteil, reduziert in weiterer Folge den Durchsatz und die Kundenzufriedenheit. Aus diesen Gründen hat dieser den höchsten Einfluss bei der Technologiewahl.
- Die Selbstentladungsrate ist insofern von geringer Bedeutung, weil KNAPP AG die Energiespeicher einerseits nicht lagert und andererseits, wenn bereits in einer Anlage installiert, längere Stillstände als über Wochenenden und an Feiertagen gemäß dem Schichtmodell nicht zu erwarten sind.
- Dem Ladeverhalten wird eine große Bedeutung zugeordnet, weil KNAPP AG den Ladevorgang selbst regelt und steuert. Es wird kein Ladegerät zugekauft. Um den Aufwand gering zu halten, ist es von Vorteil, wenn der Ladevorgang der jeweiligen Technologie als unkompliziert bezeichnet werden kann.
- Die Energiedichte ist vor allem wegen zu vermeidender Einflüsse auf die Mechanik relevant.
- Weil alle zu prüfenden Energiespeichertechnologien durch die Temperatur beeinflusst werden, KNAPP AG Lager aber in keinem kritischen Temperaturbereich betrieben werden, ist dieser Faktor für die Entscheidungsfindung mit geringer Priorität bewertet.

Wichtigkeit: 1 = unwichtig 5 = sehr wichtig	5	3	1	3	4	2	3	3	4	3	
Anforderungen	Zykluszahl (1...niedrig, 5...hoch)	Preis (1...teuer, 5...günstig)	Selbstentladung (1...hohe Rate, 5...geringe Rate)	Gefahrenpotential (1...sehr gefährlich, 5...ungefährlich)	Ladeverhalten (1...kritisch, 5...unkritisch)	Temperaturverhalten (1...empfindlich, 5...unempfindlich)	Nachhaltigkeit & Umwelt (1...schlecht, 5...gut)	Entladetiefe (1...kritisch, 5...unkritisch)	Energiedichte (1...gering, 5...hoch)	KNAPP Know-How & Erfahrung (1...gering, 5...viel)	Ergebnis
Technologie											
Bleiakkumulator	1	3	5	3	2	5	3	3	2	1	75
Lithiumionen System Li-Ion	1	5	3	4	3	4	4	2	4	3	98
Doppelschichtkondensator	5	3	3	5	5	3	5	4	1	5	124

Tabelle 16: Nutzwertanalyse für Technologiebewertung, Quelle: Eigene Darstellung.

Das Ergebnis der Nutzwertanalyse zeigt deutlich, dass für die zuvor erwähnten Ansprüche seitens KNAPP AG eine Lösung mittels Doppelschichtkondensatoren am zielführendsten sein sollte. Zusätzlich wird einem Lithiumionensystem auch Beachtung geschenkt, während eine Lösung mittels Bleiakkumulatoren vorerst für weitere Betrachtungen ausscheidet.

10 DETAILS ZUM OSR SHUTTLE™

Dieses Ebenenbediengerät besteht, je nach Generation, im Wesentlichen aus folgenden elektrischen Verbrauchern, die bei der Auslegung für ein Energieversorgungskonzept zu berücksichtigen sind. Für bereits etablierte Modelle benötigt man:

- einen Motor für den Fahrtrieb in der Ebene.
- zwei Motorrollen, die auf dem OSR Shuttle™ montiert sind und bei der Behälteraufnahme und Behälterabgabe betrieben werden.
- eine OnBoard Steuerungseinheit mit dem *Shuttle Energy Management System*.

Die neueste Generation besteht aus:

- einem Motor für den Fahrtrieb in der Ebene.
- einem Motor für den Fahrtrieb während der Querfahrt.
- zwei motorbetriebene Teleskope, die bei der Behälteraufnahme und Behälterabgabe betrieben werden.
- eine OnBoard Steuerungseinheit mit dem *Shuttle Energy Management System*.

Das erwähnte *Shuttle Energy Management System* ist bereits mit Doppelschichtkondensatoren bestückt, welche unter anderem erforderlich sind, um im Bereich einer Kreuzung, wo es keine direkte Stromversorgung gibt, die Motoren anzutreiben.

Aus strategischen Gründen wird ein Energiespeicherungskonzept zwar nur für die neueste Generation geprüft, weil aber diese Generation noch nicht unter realen Bedingungen betrieben wird, sondern nur eine Testhalle zur Verfügung steht, sollen zusätzlich aus dem älteren Modell Daten abgeleitet werden.

10.1 Das OSR Shuttle™ Doppelspiel

Zur Erhebung des Energie- und Leistungsbedarfs muss vorerst definiert werden, welche Bewegungen umgesetzt werden müssen. Man spricht hier im Haus KNAPP AG von einem *Load-Store-Zyklus* oder einem *Doppelspiel*. Dieses hat mehrere Phasen, in denen die Verbraucher nur wechselweise in Betrieb sind. Es ist keine 100 %ige Gleichzeitigkeit zu beachten!

Nachfolgende Abbildung und Beschreibung soll die Abfolge eines solchen Doppelspiels näher erläutern:

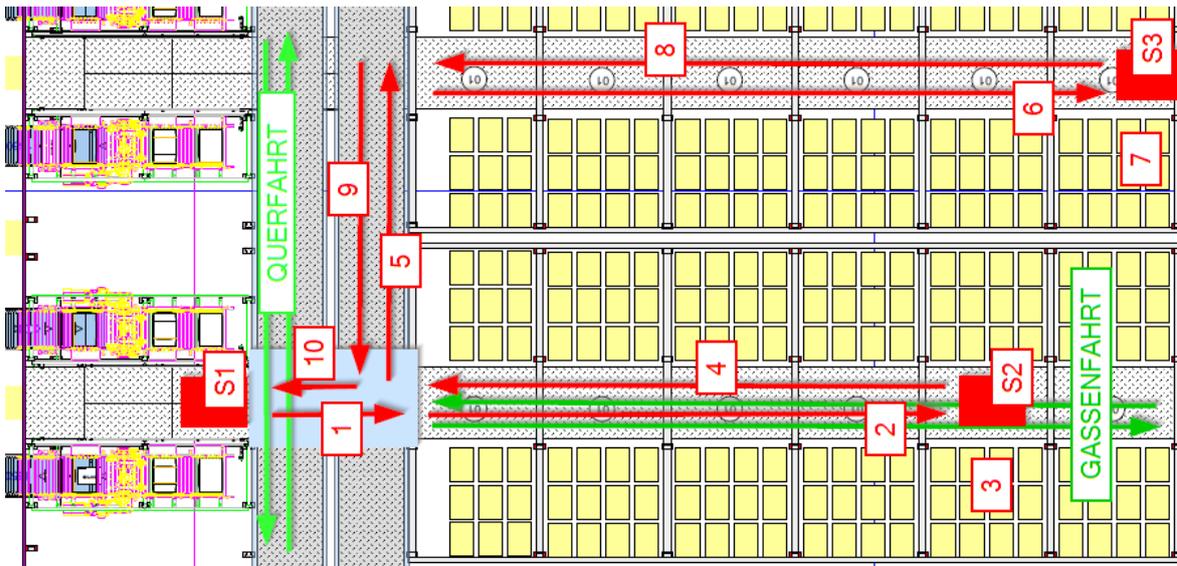


Abbildung 34: Bewegungen während eines Doppelspiels, Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an KNAPP AG OSR Layout.

Der Ablauf eines typischen Doppelspiels der neuesten OSR Shuttle™ Generation beginnt mit einem Beladenen des OSR Shuttle™ an der Übergabestelle beim Lift (OSR Shuttle™ in Position **S1**). Das OSR Shuttle™ übernimmt einen Behälter mittels Teleskopen. Mit dem Behälter an Board beschleunigt es im Anschluss für das Kreuzen der Querfahrt auf eine Geschwindigkeit von 2 m/s (**1**, **10**). In diesem hellblau markierten Bereich existiert keine Stromschiene, das OSR Shuttle™ wird über einen kleinen Puffer versorgt. Nach Verlassen des Kreuzungsbereichs beschleunigt es auf eine maximale Geschwindigkeit von 4 m/s (**2**, **8**), ehe es die Position **S2** im Regal erreicht, wo der Behälter einzulagern ist. Nun wird der Behälter mittels Teleskopen abgegeben (**3**). Danach fährt das leere OSR Shuttle™ den Weg in selber Weise wie zuvor beschrieben retour Richtung Kreuzung (**4**, **6**). Anschließend wird mittels Querfahrt mit einer Geschwindigkeit von 2 m/s die Gasse gewechselt (**5**, **9**) um jene Position **S3** zu erreichen. Dort wird ein neuer Behälter aufgenommen. Abschließend bewegt sich das OSR Shuttle™ zurück zum Lift, gibt dort einen Behälter ab und nimmt einen neuen auf.

Die Steuerungseinheit kann mit einer konstanten Stromaufnahme während des Betriebes berücksichtigt werden. Der abgebildete Stromverlauf dient in diesem Fall nur dazu, um zu veranschaulichen wie sich dieser über ein gesamtes Doppelspiel verhält. In den Kapiteln 10.3.1.2 bis einschließlich Kapiteln 10.3.1.4 wird genauer auf die einzelnen Abschnitte eingegangen.

10.2 Messungen und Daten aus bestehenden Anlagen

Ein beispielhafter Stromverlauf eines beladenen OSR Shuttle™ ist in Abbildung 35 ersichtlich. Während der Beschleunigung ist die Stromaufnahme selbstverständlich größer als bei der Fahrt mit konstanter Geschwindigkeit. Beim Bremsen ist kurzzeitig ein Stromfluss in umgekehrter Richtung erkennbar. Diese Kurve spiegelt einen Anwendungsfall einer Beschleunigung aus dem Stillstand wieder. Es gibt unzählige Parameter, die den Kurvenverlauf massiv beeinflussen. Dazu zählen zum Beispiel Getriebeübersetzung, gewünschte Beschleunigung und natürlich die bewegte Masse. Aus dem in Abbildung 35 dargestellten Fall ergibt sich eine mittlere Stromaufnahme von etwa 6,3 A. Die gewünschte Beschleunigung beträgt hier knapp 1 m/s² und der eingesetzte Motor hat ein Übersetzungsverhältnis von 10:1.

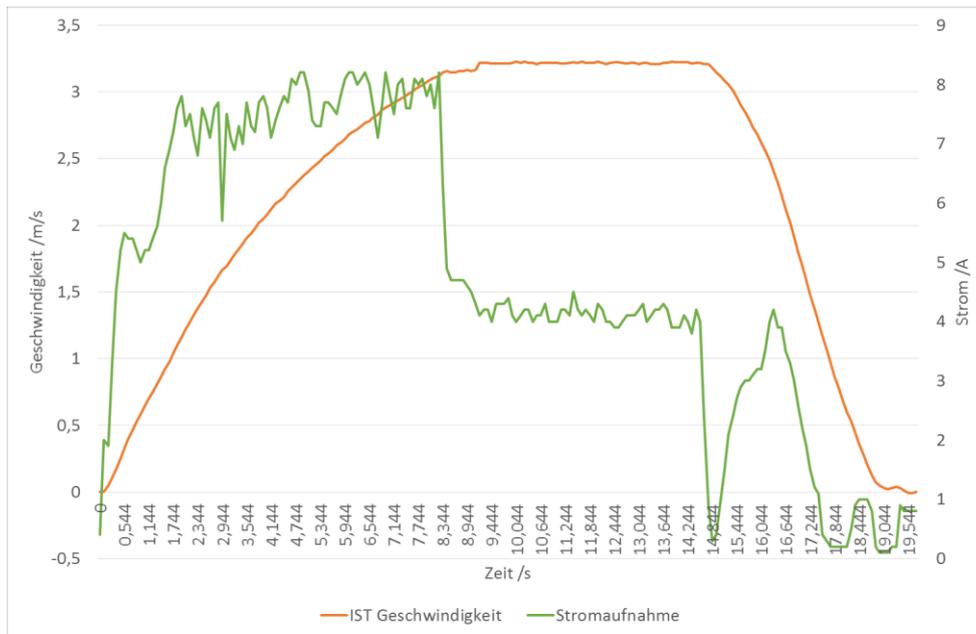


Abbildung 35: Möglicher Stromverlauf bei beladener Shuttlefahrt, Quelle: Eigene Darstellung basierend auf KNAPP AG Messungen.

Um Erkenntnisse über das Verhalten und die Regelung bei Einsatz anderer Motoren gewinnen zu können wurden bereits im Vorfeld im Haus zusätzliche Tests durchgeführt. Ausschnitte der Messergebnisse sind in Abbildung 36 ersichtlich. Die Einflussfaktoren Geschwindigkeit und Beschleunigung wurden hier auf $v_{soll} = 4 \text{ m/s}$ und $a_{soll} = 10 \text{ m/s}^2$ eingestellt. Es wurde nur die Getriebeübersetzung mit den Verhältnissen 10:1, 7,5:1 und 5:1 wechselweise getestet. Der gewünschte Beschleunigungswert diente dazu um Grenzen und Möglichkeiten der jeweiligen Motoren zu erheben und ist im realen Fall nicht von Bedeutung. Man kann auch deutlich erkennen, dass keiner der Motoren die Sollgeschwindigkeit bei diesem Testaufbau erreicht. Unter anderem basierend auf diesen Messergebnissen wurde die Entscheidung getroffen für die neueste Generation des OSR Shuttle™ den Motor mit einem Übersetzungsverhältnis von 7,5:1 einzusetzen.

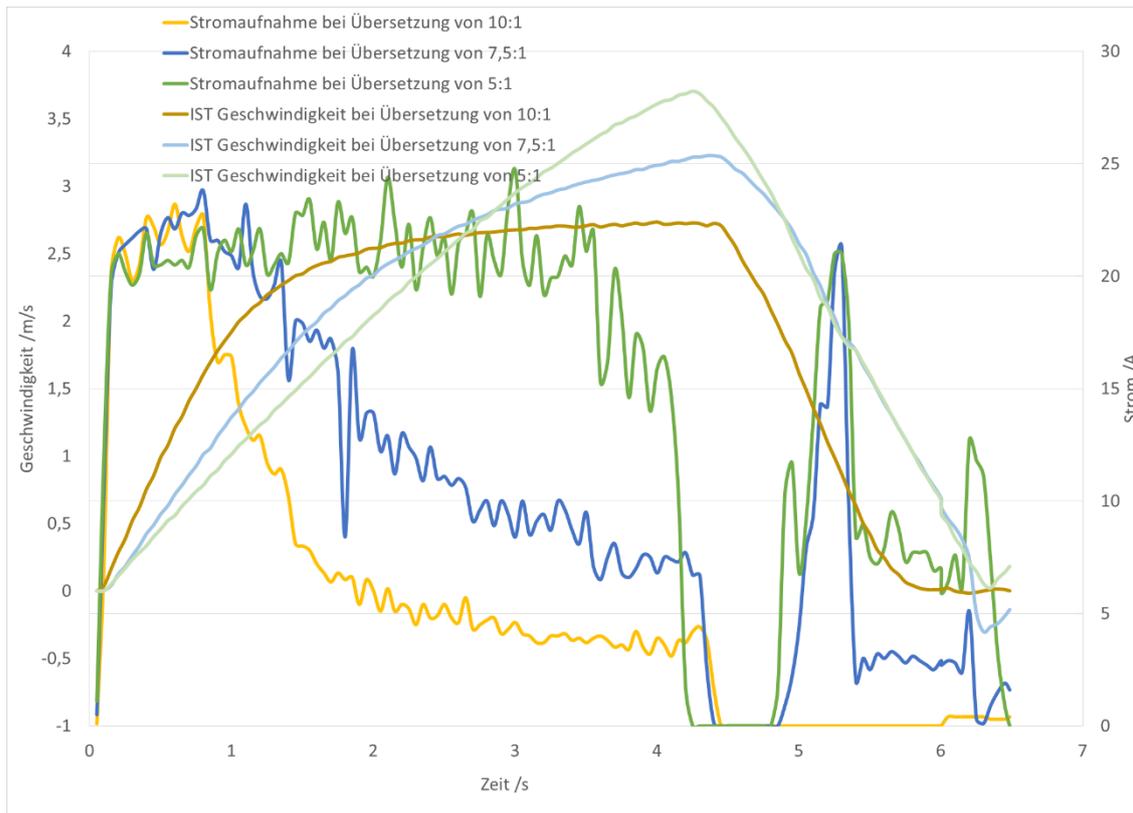


Abbildung 36: Stromaufnahmen und Geschwindigkeitsverläufe bei unterschiedlichen Getriebeübersetzungen, Quelle: Eigene Darstellung basierend auf KNAPP AG Messungen.

10.3 Erhebung des Energiebedarfs

Um den Energiebedarf für ein Doppelspiel zu ermitteln, ist es notwendig die Stromaufnahmen während der jeweiligen Phasen eines Doppelspiels zu kennen. Diese konnten teilweise im Testraum durch Messungen erhoben werden. Dazu benötigt wurden: Ein Vier-Kanal-Oszilloskop der Type Tektronix TDS 2014B, sowie eine Stromzange der Type LEM PR360.

10.3.1 Messungen im Testraum

Aus den erfolgten Messungen kann nur die Stromaufnahme während der Behälteraufnahme und -abgabe, sowie während der Querfahrt recht genau erhoben werden. Jedoch kann, durch die räumliche Beschränkung und die begrenzte Gassenlänge, die gewünschte Sollgeschwindigkeit von 4 m/s nicht erreicht werden. Aus diesem Grund kann der tatsächliche Strombedarf nur angenähert werden und eine Korrektur nach Errichten der ersten Kundenanlage, aus der man den realen Energiebedarf ermitteln kann, ist gegebenenfalls erforderlich. Es ist aber davon auszugehen, dass basierend auf den Messdaten aus bestehenden Anlagen mit der Vorgängergeneration und jenen im Testraum der angenäherte Energiebedarf keine wesentlichen Änderungen hinsichtlich Energiespeicherkonzept zu Folge haben wird.

10.3.1.1 Testkonfiguration für Antriebe

Die Konfiguration ist im Fall dieser Arbeit für Nachvollziehbarkeit und aus dokumentationstechnischen Gründen erforderlich. Sollten zukünftig mehrere Messergebnisse vorliegen, ist es damit möglich Einflüsse der Konfiguration besser abzuleiten.

742.757> Config active = POSIT	747.339> Config active = LOAD	750.493> Config active = MOTOR1	753.647> Config active = MOTOR3	843.289> Config active = LHD
ACCELERAT = 1500	ACCELERAT = 1600	TYPE = 0	TYPE = 1	LENGTH_TELE = 920
DECELERAT = 1500	DECELERAT = 1200	ENCODER = 0	ENCODER = 0	OUT_MAX = 1340
DECEL_SOFT = 700	DECEL_SOFT = 100	PULS_MM = -4285	PULS_MM = 5920	CENTER_DIST = 20
SPD_START = 100	SPD_START = 80	DEADTIME = 500	DEADTIME = 500	FL_BOX_SAVE = 15
SPD_END = 30	SPD_END = 30	OC_LEVEL = 12000	OC_LEVEL = 10000	ARMOFS_LIM = 50
POS_WINDOW = 2	POS_WINDOW = 2	OC_TO = 3000	OC_TO = 2000	ARMOFS_GAIN = 10
SPD_REF = 300	SPD_REF = 20	PWR_OFFS = 30	PWR_OFFS = 30	BOXSENS_CNT = 3
SPD_SLOW = 600	SPD_SLOW = 100	PWR_RATIO = 200	PWR_RATIO = -200	ADDSENS = 0
SPD_FAST = 3000	SPD_FAST = 1500	PWR_REDUCE = 1000	PWR_REDUCE = 30	SPD_FLAPS = 9
DISTO = 0	DISTO = 0	PWR_REVERS = 0	PWR_REVERS = 0	MOVE_FLAPS = 800
DIST1 = 0	DIST1 = 0	CTRL_PROP = 1000	CTRL_PROP = 200	DIST1_FLAPS = 0
		CTRL_INT = 5	CTRL_INT = 5	DIST2_FLAPS = 905
		CTRL_DELT = 0	CTRL_DELT = 0	
		CTRL_IMAX = 200	CTRL_IMAX = 200	
		FILT_SPD = 100	FILT_SPD = 100	
		FILT_PWR = 100	FILT_PWR = 100	

Abbildung 37: Konfigurationsprofil für den Testaufbau, Quelle: KNAPP AG OSR Shuttle™ Software.

10.3.1.2 Das Load-Store-Verfahren

Unter einem Load-Store-Verfahren versteht man im Zusammenhang mit dem OSR Shuttle™ jene Phasen, in denen Behälter aus dem Regal oder an der Übergabestelle am Lift entnommen und am OSR Shuttle™ platziert werden (*LOAD*), und umgekehrt wieder von selbst abgegeben (*STORE*) werden. Bezugnehmend auf die Abbildung 34 passiert das genau an den Positionen S1, S2 und S3. Während dieses Vorgangs bewegen sich nur die beiden motorbetriebenen Teleskopschenkel. Weil Regale nicht immer nur einen Behälter tief sind, sondern durchaus auch zwei aneinander gereihete Behälter aufweisen, unterscheidet sich die Arbeitsweise je nachdem ob der erste Stellplatz (Z1) oder der tiefer platzierte Behälter (Z2) aufgenommen und abgegeben werden soll. Um die geforderten 25 Behälter je Stunde abfertigen zu können sind demnach auch 25 Load-Store-Vorgänge erforderlich.

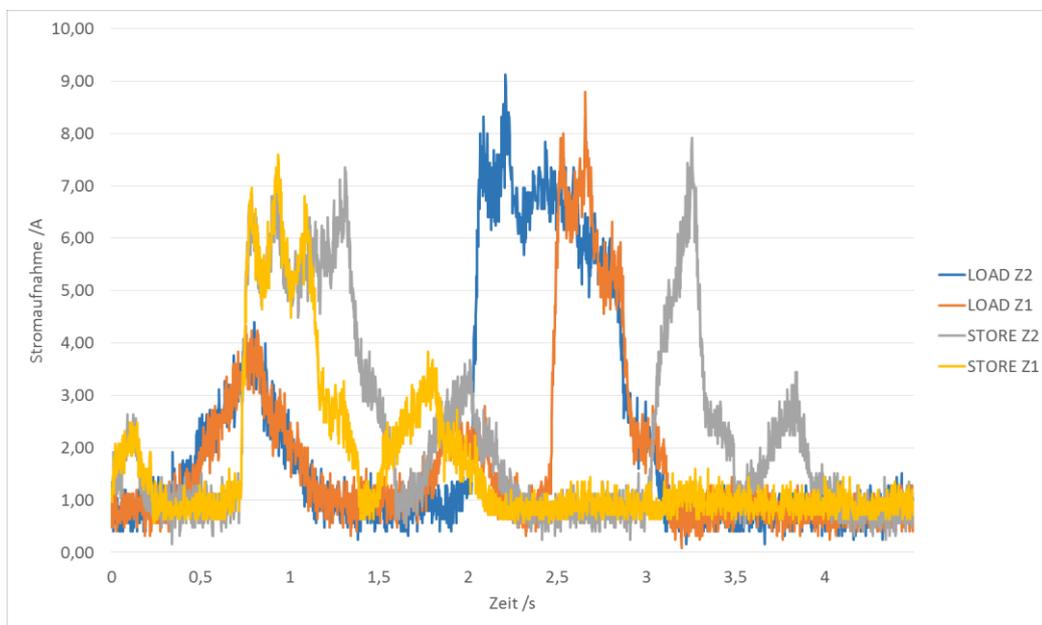


Abbildung 38: Stromaufnahme während Load-Store-Phasen, Quelle: Eigene Darstellung basierend auf KNAPP AG Messungen.

Das Load-Store-Verfahren ist von der Fahrgeschwindigkeit des OSR Shuttle™ unabhängig. Somit sind für diesen Fall die Messergebnisse auch für weitere Installationen korrekt und dienen als Basis für nachfolgende Berechnungen:

Die mittlere Stromaufnahme während LOAD Z1 beträgt 2,2 A für zirka 3,2 s.

Die mittlere Stromaufnahme während STORE Z1 beträgt 2,8 A für zirka 2,2 s.

Die mittlere Stromaufnahme während LOAD Z2 beträgt 2,8 A für zirka 3,2 s.

Die mittlere Stromaufnahme während STORE Z2 beträgt 2,4 A für zirka 4,2 s.

10.3.1.3 Das beladene OSR Shuttle™

Mit Ladegut bewegt sich eine Gesamtmasse von etwa 170 kg. Mit dieser Masse ist im Testraum die erreichbare Geschwindigkeit mit 2,5 m/s begrenzt, weil die erforderliche Streckenlänge durch die bauliche Situation nicht vorhanden ist.

Um die Messergebnisse richtig interpretieren zu können, ist es notwendig zu wissen, dass es drei unterschiedliche Szenarien gibt, die man auch eindeutig den unterschiedlichen Stromverlaufskurven zuordnen kann.

- Bei der Bewegung im Zuge einer Gassenfahrt wird aus dem Stillstand auf die Sollgeschwindigkeit beschleunigt, was immer nach einem Load-Store-Verfahren der Fall ist. Nach einer etwa 4 s andauernden Beschleunigungsphase pendelt sich die Stromaufnahme bei zirka 3,2 A ein. Dieser Wert wird für die weitere Hochrechnung auf längere Strecken herangezogen.
- Das OSR Shuttle™ kommt aus einer Kreuzung und setzt seine Fahrt innerhalb der Gasse fort. Weil das OSR Shuttle™ im Kreuzungsbereich ohnedies mit einer Geschwindigkeit von 2 m/s bewegt wird, ist die anschließende Beschleunigungsdauer, um die Sollgeschwindigkeit zu erreichen, geringer. Es kommt anfänglich zu einem wesentlich steileren Stromanstieg, weil die Doppelschichtkondensatoren des *Shuttle Energy Management Systems* sofort nach kontaktieren der Stromschienen mitgeladen werden.
- Es wird eine Querfahrt ausgeführt. In diesem Fall ist keine Beschleunigungsphase erforderlich, weil die Geschwindigkeit innerhalb der Kreuzung und während der Querfahrt mit 2 m/s gleich ist. Deswegen sinkt der Strom auch unmittelbar nachdem das *Shuttle Energy Management System* wieder aufgeladen ist.

Zusätzlich ist in Abbildung 39 auch die Stromaufnahme beim Versuch eine Geschwindigkeit von 3 m/s zu erreichen, dargestellt. Man kann daraus deutlich erkennen, dass die Beschleunigungsphase den gesamten Messbereich beansprucht und die Stromaufnahme nicht sinkt. Vergleichsweise dazu ist bei den geringeren Geschwindigkeiten deutlich zu erkennen, wann die Beschleunigungsphase beendet ist, weil es zu einer massiven Reduktion der Stromaufnahme kommt.

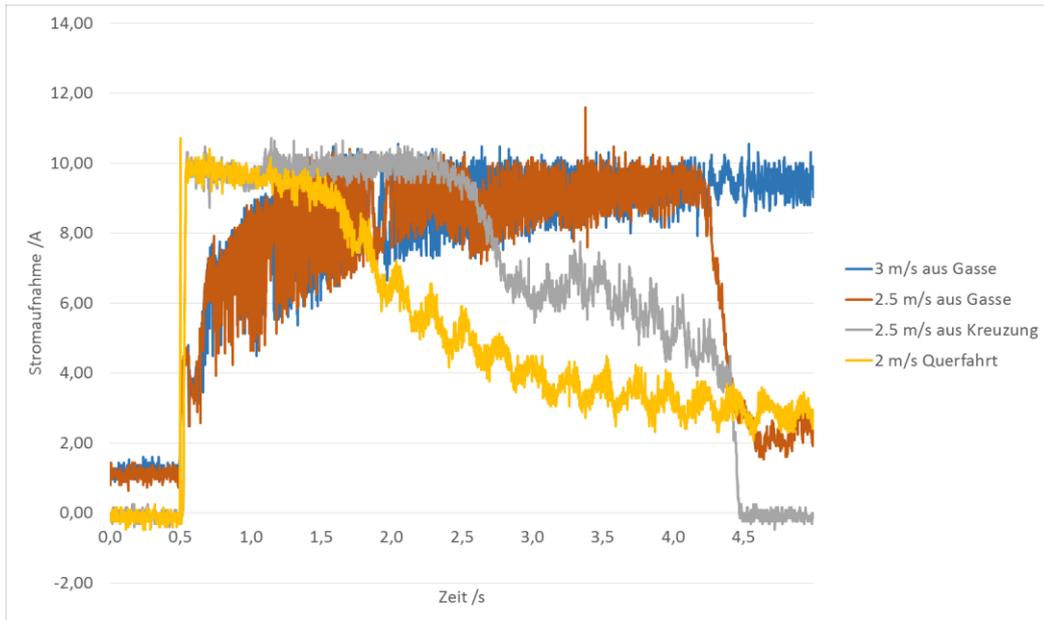


Abbildung 39: Stromaufnahme bei Bewegungen des beladenen OSR Shuttle™, Quelle: Eigene Darstellung basierend auf KNAPP AG Messungen.

10.3.1.4 Das nicht beladene OSR Shuttle™

Das leere OSR Shuttle™ hat eine Eigenmasse von etwa 120 kg. Die Bewegungsabläufe decken sich mit jenen des beladenen OSR Shuttle™. Es kann durch die reduzierte Masse sogar auf die kurze Strecke eine höhere Geschwindigkeit von 3 m/s erreicht werden. Um aber den direkten Vergleich zwischen den Messwerten zu haben, wird für die Berechnung des Energiebedarfs immer nur das Stromprofil der Fahrt mit 2,5 m/s herangezogen.

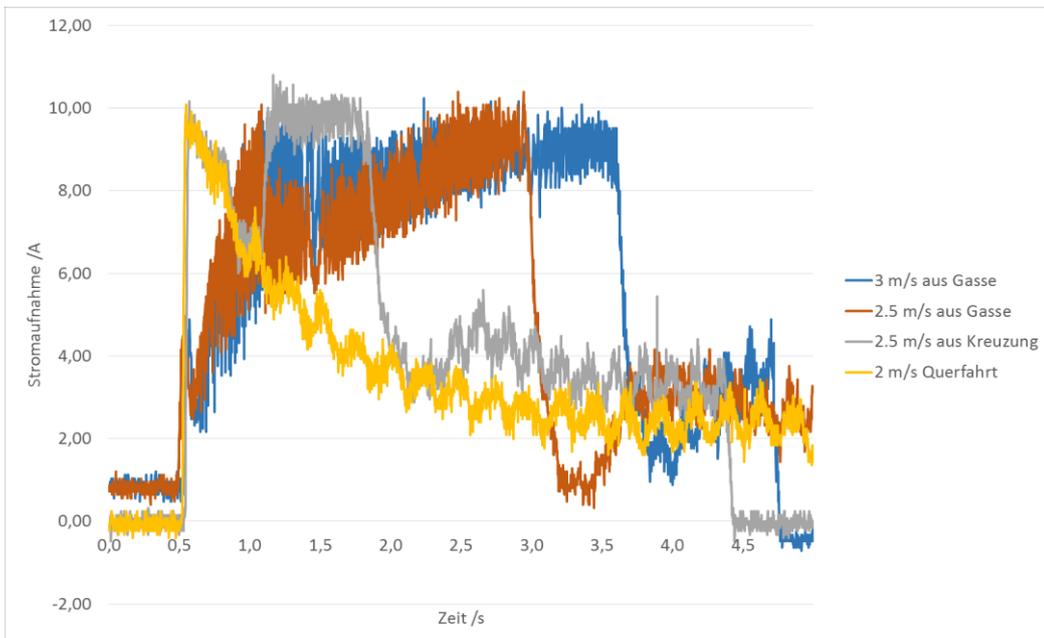


Abbildung 40: Stromaufnahme bei Bewegungen des nicht beladenen OSR Shuttle™, Quelle: Eigene Darstellung basierend auf KNAPP AG Messungen.

10.3.1.5 Gesamtbewertung eines Doppelspiels, Zyklenzahl

Um den Energiebedarf ermitteln zu können, ist neben der bereits in den vorangegangenen Kapiteln erläuterten Stromaufnahmen je Phasen auch der Faktor Zeit von Bedeutung. Aus den Messungen ist ersichtlich, wie lange die jeweiligen Schritte des Prozesses dauern. Bezüglich einer möglichen Anlagenausdehnung werden vorerst 150 m Gassenlänge, sowie eine 50 m Querfahrt festgelegt. Zusätzlich wird nur ein Einlagerungsprozess für die tiefere Regalposition (Z2) berücksichtigt, weil dieser einerseits länger dauert und somit auch die höhere Ladungsmenge benötigt.

Diese Bewegungen und Strecken entsprechen einer Maximalanforderung.

Aus allen Messungen wurden die Beschleunigungsphasen ermittelt. Mit diesen ist es möglich die Zeiten der einzelnen Phasen und die Gesamtdauer eines Doppelspiels zu errechnen. Bei 2,5 m/s dauert dieses 340 s. Die mittlere Stromaufnahme ergibt sich rechnerisch mit 3,3 A. Diese beiden Werte dienen als Grundlage für die Berechnung der erforderlichen Ladungsmenge.

10.3.2 Energiebedarf des OSR Shuttle™

Der erforderliche Energiebedarf für ein Doppelspiel kann anhand der Messdaten und der Spezifikation der Betriebsspannung einfach ermittelt werden.

Es gilt:

$$Q = It \tag{10.1}$$

Q/As	elektrische Ladung
I/A	Stromstärke
t/s	Zeit

Somit ergibt sich eine erforderliche Ladungsmenge von 1122,0 As. Die erforderliche Betriebsspannung beträgt 58 VDC, was bei reduzierter Geschwindigkeit zu einer Durchschnittsleistung von 191,4 W und einem Energiebedarf von 65076,0 Ws führt. Weil bei erhöhter Geschwindigkeit zwar die Stromaufnahme steigen wird, zugleich aber die erforderliche Zeitspanne sinkt, werden für weitere Betrachtungen diese ermittelten Werte herangezogen.

Zusätzlich ist zu beachten, dass die Betriebsspannung des Reglers 25 VDC nicht unterschreiten darf, weil dieser sonst außerhalb der Regelparameter betrieben würde. Somit darf auch die Spannung seitens Energiespeicher nicht unter diesen Wert absinken.

Um über die gesamte Strecke die geforderte Geschwindigkeit halten zu können, bedarf es einer konstanten Leistung, die aus dem Speicher entnommen werden muss. Das ist für die Auswahl des Energiespeichers relevant.

10.4 Ausführung mit Doppelschichtkondensatoren

10.4.1 Ermittlung der verfügbaren und erforderlichen Kapazität

Für die Ausführung des Energiespeichers mittels Doppelschichtkondensator ist der Einsatz eines LSUC 003R0S 0380F EA von LS Ultracapacitor zu prüfen.

Relevante Daten:

Zellenspannung	/ V	3,0
Ladezyklen		500000
Nennkapazität	/ F	380
Kapazitätstoleranz	/ %	-5/+15
Max. speicherbare Energie	/ Wh	0,48
Masse	/ g	72

Tabelle 17: Technische Daten des LSUC 003R0S 0380F EA, Quelle: Eigene Darstellung basierend auf Angaben aus Datenblatt von LS Ultracapacitor (Hrsg.).

Um die Performance bei Einsatz von Doppelschichtkondensatoren zu ermitteln, wurde eine Messschaltung aufgebaut. Hierfür wurden Doppelschichtkondensator-Packs mit der ermittelten Last beschaltet und das Entladeverhalten aufgezeichnet. Die Konfiguration des Packs ergibt sich aus der erforderlichen Betriebsspannung von 58 VDC und der Zellenspannung von 3 VDC.

$$U_{ges} = \sum U_0 \quad (10.2)$$

U_{ges}/V Gesamtspannung

U_0/V Zellenspannung

Das erfordert eine Serienschaltung von zumindest 20 Stück der obigen Superkondensatoren. Um Leistungsreserven zu haben wurde die Stückzahl anstelle der errechneten 20 Zellen auf 22 Zellen erhöht. Die Gesamtkapazität eines Packs errechnet sich folgendermaßen:

$$\frac{1}{C_{ges}} = \sum \frac{1}{C_n} \quad (10.3)$$

C_{ges}/F Gesamtkapazität

C_n/F Einzelkapazitäten

Somit ergibt sich eine Kapazität von 16,41 F, wobei als Berechnungsbasis hierfür der gemäß Datenblatt untere Toleranzwert herangezogen wurde. Diese wurde über eine konstante Last und einer erforderlichen Leistung von 192 W entladen.

Als Last diente die EA-EL 9080-200 (80 V, 200 A, 2400 W, 100 R). Zusätzlich zu einem Vier-Kanal-Oszilloskop der Type Tektronix TDS 2014B und einer Stromzange der Type LEM PR360 wurde eine Tektronix P220 Voltage Probe zur Spannungsaufzeichnung verwendet.

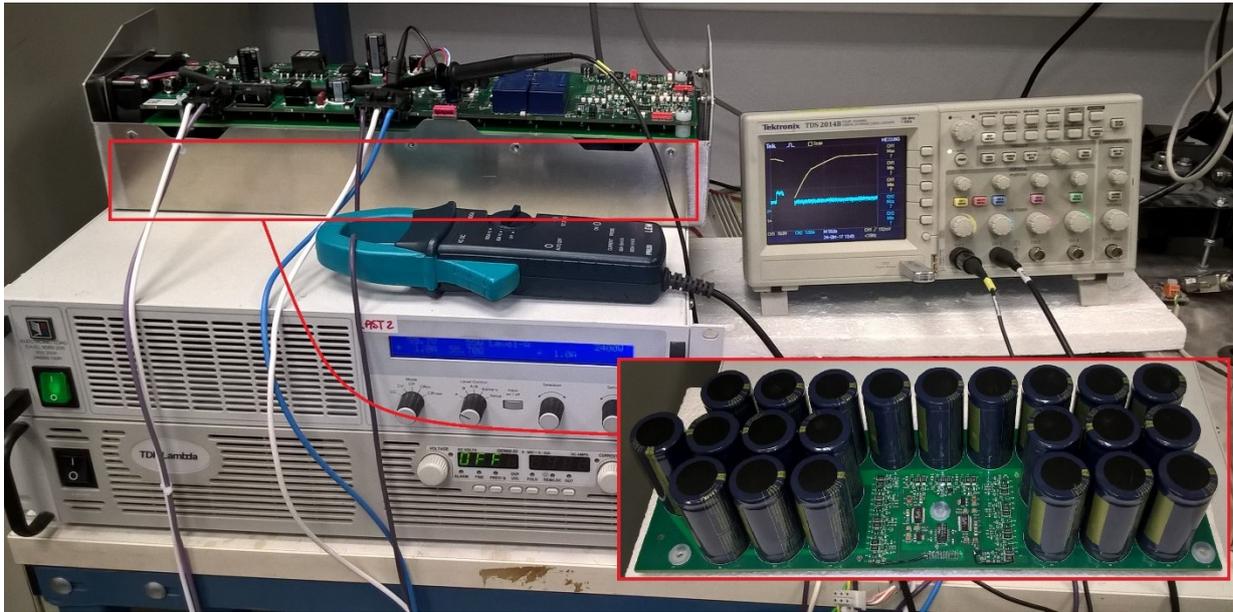


Abbildung 41: Messaufbau zur Ermittlung des Entladeverhaltens des Doppelschichtkondensator-Packs, Quelle: Eigene Aufnahme.

Der Sinn der Messung ist es feststellen zu können, auf welchen Wert die Spannung unter einer konstanten Last von 192 W absinkt. Es ist unbedingt notwendig, zumindest für die Dauer des Doppelspiels, nicht unter die bereits erwähnten 25 VDC abzusinken. Sinkt die Spannung unter diesen Wert, kann daraus gefolgert werden, dass der Energiespeicher zu gering dimensioniert wurde.

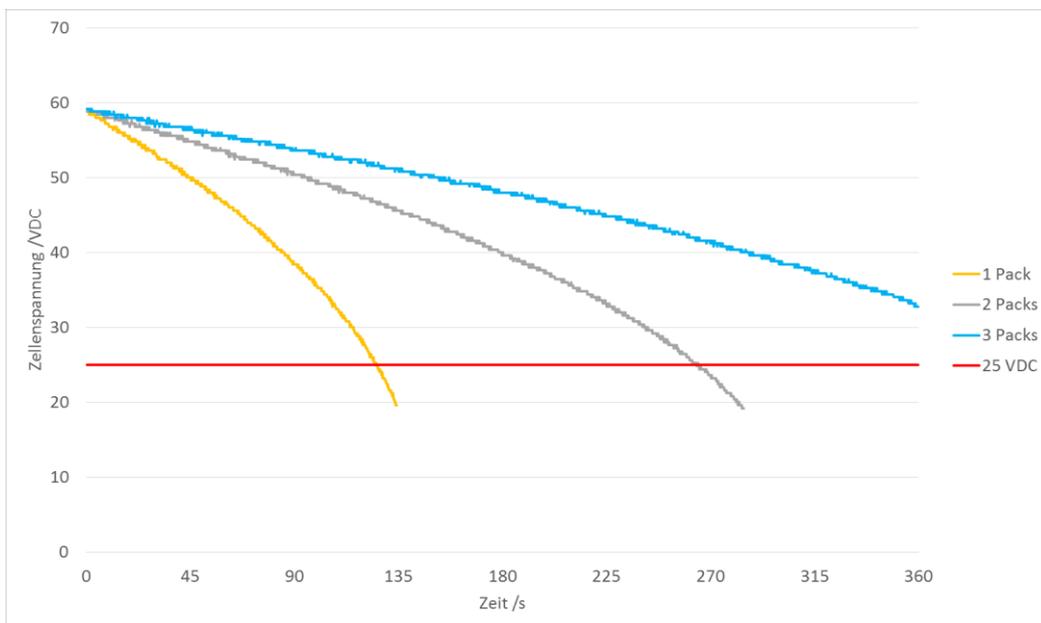


Abbildung 42: Messergebnis des Entladeverhaltens des Doppelschichtkondensator-Packs bei konstanter Last, Quelle: Eigene Darstellung.

Der gemessene Spannungspegel bei Erreichen der 340 s ist wiederum ein Indikator für die entnommene Energie- und Ladungsmenge.

Es gilt:

$$E = \frac{CU^2}{2} \quad (10.4)$$

E/Wh elektrische Energie des Kondensators

U/V Spannung

C/F Kapazität

Bei der ersten Messung wurde ein Pack mit einer Serienschaltung von 22 Doppelschichtkondensatoren verwendet. Bei nachfolgenden Messungen wurde je ein weiteres Pack parallel dazu geschaltet. Dadurch bleibt zwar die Spannung die gleiche, es erhöht sich aber die verfügbare Kapazität.

Wie Abbildung 42 zu entnehmen ist, reicht für ein Doppelspiel weder ein, noch zwei Doppelschichtkondensator-Packs aus um die erforderliche Spannung aufrecht zu erhalten. Erst mit einem dritten Pack können die 340 s erreicht, beziehungsweise sogar überschritten werden. Die gemessene Spannung zum Zeitpunkt $t = 340$ s liegt bei 35 VDC und somit deutlich in einem nutzbaren Bereich.

Daraus ergibt sich nun weiter die tatsächlich entnommene Ladungsmenge während eines Doppelspiels:

$$\Delta E = E_{(t=0)} - E_{(t=310)} = \frac{CU_{t=0}^2}{2} - \frac{CU_{t=340}^2}{2} \quad (10.5)$$

Die Messung zeigt auch, dass es leichte Abweichungen zwischen theoretisch errechneten und tatsächlich gemessenen Werten gibt. Für weitere Berechnungen und Recherchen wird mit den errechneten Werten gearbeitet.

10.4.2 Zyklenzahl und Durchsatz

10.4.2.1 Lade- und Entladezyklen

Basierend auf den in Kapitel 10.4.1 ermittelten Daten, kann nun das Verhältnis von Ladezeit zu Entladezeit erhoben werden. Dazu ist es vorab notwendig festzuhalten, dass beim angedachten Energiemanagement Konzept nur ein Ladepunkt angedacht wird. Dieser wird sich bevorzugter Weise an der Übergabestelle beim Lift befinden, weil dort im Zuge der Behälteraufnahme und -abgabe das OSR Shuttle™ ohnedies stillsteht. Die Tatsache, dass somit während eines Load-Store-Vorganges bereits geladen werden kann, bleibt für weitere Überlegungen unberücksichtigt. Weil bei der Ermittlung des Energiebedarfs für ein Doppelspiel der Load-Store-Vorgang zur Gänze zu Lasten des Energiespeichers betrieben wird, entspricht dies somit ohnehin dem ungünstigeren Fall.

Der Ladevorgang an dieser Ladeposition wird mit 40 A Ladestrom und 48 VDC erfolgen. Netzgeräte dafür sind in einem Schaltschrank bereits für die Versorgung der aktuell notwendigen Stromschienen vorhanden. Somit wäre diesbezüglich kein Modifizierungsaufwand notwendig. Die Differenzspannung um die 58 VDC erreichen zu können, wird über einen bidirektional einsetzbaren DC-DC-Konverter erzeugt.

Mit diesen Festlegungen ergibt sich ein Spannungspegel von 26 VDC, der nach Beendigung eines Doppelspiels noch an den Packs anliegen würde. Bei einem Ladestrom von 40 A benötigt man knapp 40 s um die Doppelschichtkondensatoren wieder vollständig aufzuladen. In Summe betrachtet bedeutet das,

dass ein gesamter Zyklus sich aus Ladezeit und Entladezeit zusammensetzt und somit 380 s betragen würde.

10.4.2.2 Optimierungsmöglichkeiten und Anregungen

Weil ein Doppelspiel mit einer Dauer von 380 s sich nicht mit der geforderten Durchsatzzahl von 25 Behältern pro Stunde vereinbaren lässt, bedarf es hier dahingehend zu optimieren. Dazu wird im ersten Schritt die Dauer eines Doppelspiels bei Erreichen der Sollgeschwindigkeit von 4 m/s ermittelt. Nach Geschwindigkeitskorrektur ergibt sich hierfür eine Dauer von 300 s. Die zulässige Gesamtdauer darf aber 25/3600, also 144 s, im Mittel nicht überschreiten.

Das bedeutet, dass unabhängig vom Energieversorgungskonzept, die zur Auslegung herangezogene Fahrtstrecke überdimensioniert ist. Es ist jedoch sinnvoll, die Maximalausprägung abfahren zu können und über die Steuerung die Wege so zu errechnen, dass durch das Verhältnis von kurzen Strecken zu langen Strecken der Output wiederum passt.

Durch neue Layout Möglichkeiten was ein OSR Regal betrifft, ist es aber auch vorstellbar annähernd gleichlange Strecken je Doppelspiel abzufahren. Unter Berücksichtigung der gemessenen Beschleunigungswerte und einer Hochrechnung mit einer Geschwindigkeit von 4 m/s ergeben sich grob mögliche Ausprägungen gemäß Tabelle 18.

Dauer Doppelspiel / s		Strecke für Gassenfahrt / m				
		40	50	60	70	80
Strecke für Querfahrt / m	0	90	100	110	120	130
	10	100	110	120	130	140
	20	110	120	130	140	150
	30	120	130	140	150	160
	40	130	140	150	160	170

Tabelle 18: Übersicht Dauer eines Doppelspiels in Abhängigkeit der Strecken, Quelle: Eigene Darstellung.

Sollte es das Layout zulassen und man kann tatsächlich obige Streckenlängen einhalten, würde sich, wie das in Abbildung 42 dargestellte Messergebnis belegt, eine Einsparung von einem Pack realisieren lassen. Dafür spricht neben der Platz- und Gewichtsersparnis zusätzlich auch der finanzielle Aufwand. Gegen die Einsparung des dritten Packs sprechen zumindest die geringere Flexibilität gegenüber Anlagenlayouts mit anderen Fahrprofilen und der Faktor Prozessfehler beziehungsweise der damit erforderlichen Stillstandsüberbrückung. Wann diese Überbrückungen notwendig werden können und welchen Einfluss diesbezüglich die Wahl des Energiespeichers hat, wird in Kapitel 10.7.1 näher erklärt.

Zusätzlichen Optimierungsspielraum würde die Überlegung sogar ein viertes Doppelschichtkondensator-Pack zu installieren dahingehend bringen, weil dadurch drei Doppelspiele gemäß vorheriger Tabelle ohne Aufladung umgesetzt werden könnten und sich so wiederum die Zyklenzahl verringern und die Lebensdauer enorm verbessern würde. Die Masse der Doppelschichtkondensatoren würde in Summe nur rund 6,5 kg betragen und somit auf die Gesamtmasse einen vernachlässigbar kleinen Einfluss haben. Eher

zu prüfen wäre der notwendige Platzbedarf. Ein Pack aus 22 Stück Doppelschichtkondensatoren benötigt etwa 400 x 120 x 70 mm.

10.5 Ausführung mit einem Lithiumionensystem

10.5.1 Dimensionierungsansatz

Eine weitere Möglichkeit der Energiespeicherung könnte der Einsatz eines Lithiumionensystems sein. Wegen der niedrigeren Zyklenzahl, als jene des Doppelschichtkondensators, muss das Konzept hier überdacht und adaptiert werden. Selbst bei der Annahme, der Lithiumionenakkumulator hat eine prognostizierte Zyklenzahl von 1000, entspricht das nur einem Bruchteil des Wertes der mit dem Doppelschichtkondensator erreicht werden kann. Deswegen müsste die Anzahl der Ladezyklen stark reduziert werden. Das lässt sich unter Berücksichtigung des geforderten Durchsatzes nur realisieren, wenn man wesentlich längere Phasen hat, wo keine Aufladung erforderlich ist.

Wenn man dem Datenblatt des Doppelschichtkondensators glauben darf, wird bei einer jährlichen erforderlichen Zyklenzahl von 100000 erst nach fünf Jahren ein Austausch notwendig sein. Umgelegt auf ein Lithiumionensystem würde das bedeuten, dass pro Arbeitstag weniger als einmal geladen werden dürfte, um zumindest theoretisch ebenso erst nach fünf Jahren den Akkumulator tauschen zu müssen. Selbst wenn man die Zyklenzahl völlig ausschöpft und man wegen des Arbeitsprozesses nur einmal täglich auflädt, wäre nach spätestens vier Jahren das Akkumulator-Paket auszutauschen. Auf den Behälterdurchsatz von 25 Behälter je Stunde und die tägliche Arbeitszeit von 16 Stunden umgemünzt würde das wiederum 400 aufeinanderfolgende Doppelspiele bedeuten, ehe es zu einem Ladevorgang kommen sollte. Dazu würde eine Ladungsmenge von etwa 50 Ah benötigt werden. Außerdem müsste der Energiegehalt etwa 2770 Wh betragen.

10.5.2 Auslegung des Akkumulators

10.5.2.1 Grundanforderungen und technische Daten

Für weitere Betrachtungen wird ein 24 VDC Akkumulator eingesetzt. Auch in diesem Fall soll mittels DC-DC-Konverter die Spannung von 58 VDC erreicht werden. Somit ist keine Serienschaltung mehrerer Akkumulatoren notwendig um die Spannung zu erhöhen. Um jedoch den Energiegehalt zu vervielfachen, sind entsprechend viele Parallelstränge zu verschalten.

Um eine konkrete Berechnung umsetzen zu können, wird mit den Daten eines marktüblichen Akkumulators gearbeitet. In diesem Fall ist der Einsatz eines Produktes von AccuPower angedacht.

Relevante Daten:

Nennspannung	/V	25,9
Nennkapazität	/Ah	10,4
Nennenergiegehalt	/Wh	270
Zyklenzahl (bei 80 % DoD) <i>Annahme</i>		~1000
Max. Ladestrom	/A	15
Max. Entladestrom	/A	15
Abmessungen, L x B x H	/mm	167 x 100 x 79
Masse	/kg	1,65

Tabelle 19: Technische Daten des AP2510-GG, Quelle: Eigene Darstellung basierend auf Angaben aus Datenblatt von AccuPower (Hrsg.).

10.5.2.2 Korrekturen wegen Akkumulator-Spezifikationen

Um die höchstmögliche Zyklenzahl und in weiterer Folge die längste Lebensdauer des Akkumulators zu erzielen, empfiehlt es sich eine Entladetiefe (DoD) von 80 % nicht zu unterschreiten. Auch ist ein Rückgang der verfügbaren Kapazität mit steigender Zyklenzahl wie Abbildung 43 dargestellt zu berücksichtigen.

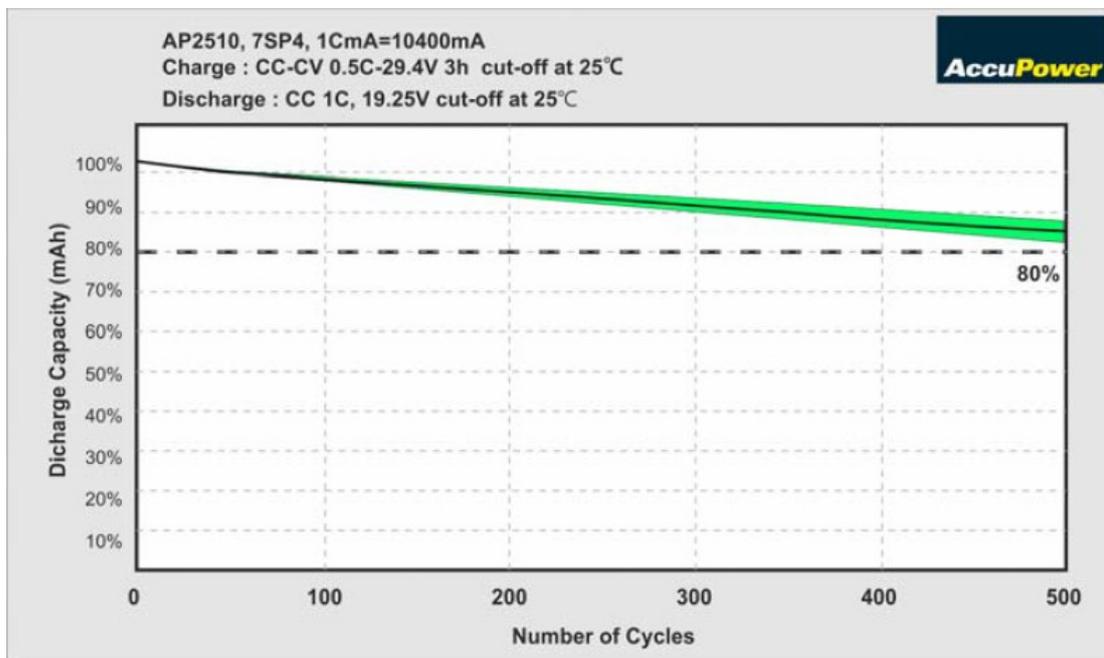


Abbildung 43: Nennkapazität des Akkumulators in Abhängigkeit der Zyklenzahl, Quelle: Datenblatt von AccuPower (Hrsg.).

Das bedeutet, dass bezüglich Dimensionierung Korrekturmaßnahmen vorgenommen werden müssen. Zusätzlich reduziert sich durch diese Schwächen auch der Vorteil der höheren Energiedichte im Vergleich zu jener des Doppelschichtkondensators.

- Dass die Entladetiefe maximal 80 % betragen soll, ist gleichbedeutend mit einer erforderlichen Überdimensionierung des Energiespeichers. Das würde annäherungsweise bedeuten, dass der erforderliche Energiebedarf nur 4/5tel des verfügbaren ausmachen darf. Es resultiert daraus eine erforderliche, verfügbare Energiemenge von 3455 Wh.
Unter Beachtung der Tatsache, dass für eine Vervielfachung der seitens Akkumulator verfügbaren Energiemenge eine Parallelschaltung mehrerer notwendig ist, bedeutet das letztendlich eine Gesamtzahl von 13 Stück um die geforderten 3455 Wh zu erreichen!
- Wenn man zusätzlich die Nennkapazität in Abhängigkeit der Zyklenzahl berücksichtigt und man den Verlauf der Abnahme als linear betrachtet, wäre bereits nach etwa 55 Zyklen die Ladungsmenge kritisch, weil die Entladetiefe nicht mehr eingehalten werden könnte.

Wenn diese Aspekte bedacht werden, würden 17 Akkumulatoren parallel betrieben werden müssen um die Lebenserwartung von 1000 Zyklen zu erreichen. Diese Zahl ergibt sich daraus, dass nach 1000 Ladezyklen zumindest noch 3455 Wh bei vollem Akkumulator verfügbar sein müssen um nicht unter die 80 % DoD zu sinken. Das ist insofern als Sicherheitsabschätzung zu betrachten, weil eine tiefere Entladung zwar zulässig ist, aber die Zyklenzahl zusätzlich verschlechtern würde. Wenn man nun eine Geradengleichung basierend auf Abbildung 43 ansetzt, muss sich für N ein Wert ≥ 1000 ergeben.

$$N = \frac{E_{0(N)}E_{80}}{k} \tag{10.6}$$

$N/1$	Zyklenzahl
$E_{0(N)}/Wh$	Nennkapazität in Abhängigkeit der Zyklenzahl
E_{80}/Wh	80 % Energiegehalt wegen DoD
$k/1$	Geradensteigung aus Abbildung 43

Während die Kubatur im Vergleich zum Doppelschichtkondensator System nur unwesentlich größer wird, verhält es sich beim Gewicht anders – hier würde knapp 30 kg Zusatzmasse in Form der Akkumulatoren transportiert werden müssen.

Der Aufladevorgang wird bei 15 A Ladestrom etwas mehr als drei Stunden andauern. Das lässt sich mit der acht stündigen Nachtpause gut vereinbaren.

10.6 Ausführung mit einem Hybridsystem

Beide zuvor betrachteten Varianten haben ihre Vor- und Nachteile. Es soll abschließend noch eine weitere Möglichkeit betrachtet werden, die aus einer Kombination beider Technologien aufgebaut wird. Um diese Ausführung genauer einschätzen zu können, folgt eine kurze Schilderung der angedachten Funktion.

Das OSR Shuttle™ benötigt etwa 1 A Dauerstrom zur Versorgung der gesamten Steuerungseinheit. Durch die konstante Belastung und keine zu erwartenden Spitzen kann diese Last gut durch einen Akkumulator versorgt werden. Weil die Steuerung ausschließlich mit 24 VDC arbeitet, kann diese direkt über den zuvor betrachteten Akkumulator versorgt werden.

Der Leistungsteil soll weiter von Doppelschichtkondensatoren gespeist werden.

Durch diese Modifikationen ergibt sich für den Akkumulator-Bedarf: Bereits mit zwei parallelbetriebenen Akkumulatoren ist ein Ganztagesbetrieb realisierbar. Unter Einflussnahme von altersbedingter Verschlechterung der Performance und dem DoD-Wert von 80 % kann jedoch nur mit annähernd 60 Zyklen gerechnet werden, ehe ein Austausch notwendig ist. Das würde etwa viermal jährlich einen Austausch bedeuten und ist somit nicht akzeptabel. Setzt man drei Akkumulatoren ein, würde bereits mehr als ein Jahr problemlos der Betrieb aufrechterhalten werden können, was mit Sicherheit eher zu dulden ist. Eine vernünftige Konstellation sollten vier Akkumulatoren mit zweijährigem Austauschintervall darstellen.

Für den Leistungsteil bleibt eine mittlere Stromaufnahme von nunmehr 2,3 A. Hier gilt es wiederum einerseits die Streckenprofile und andererseits den geforderten Durchsatz optimal in Relation zueinander zu stellen.

Für das Erreichen des Durchsatzes sind bereits zwei Doppelschichtkondensator-Packs ausreichend. Die Restspannung nach einem Doppelspiel würde aus den Energiemengen errechnet etwa 48 VDC betragen und die erforderliche Ladezeit würde nur etwa 8 s benötigen. Dieser Wert entspricht zugleich beinahe der Dauer eines Load-Store-Verfahrens, was so viel bedeutet wie, dass kaum tatsächliche Stillstandzeiten nötig sind und das OSR Shuttle™ deswegen beinahe pausenlos verfügbar ist.

Legt man die Doppelschichtkondensatoren bei reduzierter Leistungsaufnahme auf die maximale Anlagenausdehnung aus, sprich auf die zuvor erläuterten 340 s Dauer eines Doppelspiels ohne Aufladephase, würde der Spannungswert von 25 VDC mit zwei Packs äußerst knapp unterschritten. Es ergibt sich ein errechneter Wert von 24,5 VDC. Mit drei Parallelsträngen hat man dieses Problem bereits sicher im Griff.

Einen vernünftigen Kompromiss aus diesen beiden Anforderungen stellt der Einsatz von nur zwei Packs dar. Eine Annäherung des Leistungsbedarfes bei maximaler Geschwindigkeit ergibt eine höchstzulässige Dauer 220 s. Daraus ergibt sich eine Übersicht möglicher Teilstrecken gemäß Tabelle 20. Grüne Felder kennzeichnen Werte, die eingehalten werden müssen um den Durchsatz von 25 Behältern pro Stunde zu erreichen. Gelb markierte Felder hingegen zeigen auf, welche zusätzlichen Strecken unter Berücksichtigung der verfügbaren Energie- und Ladungsmenge erreicht werden können.

Dauer Doppelspiel /s		Strecke für Gassenfahrt / m											
		40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150
Strecke für Querfahrt / m	0	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200
	10	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210
	20	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220
	30	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220	
	40	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220		
	50	140	150	160	170	180	190	200	210	220			
	60	150	160	170	180	190	200	210	220				

Tabelle 20: Übersicht Dauer eines Doppelspiels in Abhängigkeit der Strecken, Quelle: Eigene Darstellung.

10.7 Zusätzliche Aufgabenstellung bei Einsatz eines Energiespeichers am OSR Shuttle™

Dieses Kapitel befasst sich nicht direkt mit dem Konzept des Speichers als solches, es dient dazu im Zuge einer geplanten Umstellung nachfolgende Sachverhalte nicht außeracht zu lassen.

Bei der Dimensionierung des Energiespeichers wurde in der vorangegangenen Auslegung nur der Normalbetrieb bedacht. Es wurde davon ausgegangen, dass am Ende eines Doppelspiels der Aufladepunkt erreicht wird, beziehungsweise, dass ein Doppelspiel ohne Unterbrechungen vonstattengeht. Das stellt jedoch nur den Idealfall dar und muss in der Realität nicht so sein. Es ist durchaus mit unplanmäßigen Stillständen zu rechnen. Alle Energiespeicher sind allein schon wegen ihrer Nenndaten ohnedies nicht punktgenau auf den tatsächlichen Energiebedarf auslegbar, sondern überdimensioniert. Dieser Puffer wird selbst im Fall eines Stillstandes entleert und wird somit irgendwann eine kritische Entladetiefe erreichen.

Deswegen darf bei der Überlegung einer OnBoard Energieversorgung nicht unbeachtet bleiben, dass es Fälle gibt, in denen sich das OSR Shuttle™ entweder gar nicht bewegen darf oder nur eingeschränkt bewegt werden kann. Dabei handelt es sich entweder um Prozess- und Systemfehler, oder um Not-Halt beziehungsweise um die sogenannte Gassenbegehung.

10.7.1 Prozess- und Systemfehler

Es gibt unzählige Möglichkeiten, die zu Fehlern führen können. Für die Betrachtung bezüglich dem Einsatz eines Energiespeichers sind vor allem jene Fehler von großer Bedeutung, wo ein Erreichen des nächsten Ladepunktes problematisch wird.

Einen der einfachsten, aber zugleich einen nicht zu vernachlässigenden Fehler, stellt der Netzausfall dar. Vor allem weil KNAPP AG international agiert und Anlagen auch in Ländern mit instabilen Netzen betreibt, muss man sich dieser Thematik annehmen. Die Konsequenz eines solchen wäre, dass sich das OSR

Shuttle™ zwar noch zu seinem Ladepunkt bewegen könnte, dort jedoch nur für begrenzte Zeit funktionieren kann. Selbst wenn keine Motoren betrieben werden, würde letztendlich durch den Energiebedarf der Steuerung der Energiespeicher entleert und eine Abschaltung muss erfolgen.

Andererseits können Fehler aber auch auftreten, wenn sich zum Beispiel durch einen Defekt einer Transporteinheit Staus bilden und die anderen Transporteinheiten dadurch vielleicht länger auf den Energiespeicher zugreifen müssen als gedacht. Natürlich kann diese Eventualität durch die Steuerung insofern gut beherrscht werden, dass man genügend Energiereserven bedenkt, um im Fall eines Staus nicht über die kürzeste, sondern eine längere Umleitung den Fahrbefehl abschließen und die Ladestelle erreichen kann. Sollte aber dennoch ein Problem auftreten und eine der Transporteinheiten innerhalb einer Anlage länger verharren müssen, ohne den Normalbetrieb weiterführen zu können, gilt es sich damit auseinander zu setzen, wie ein solcher Prozessfehler dann behoben werden kann.

10.7.1.1 Sleep-Modus

Eine Möglichkeit ist hinsichtlich der Steuerung des OSR Shuttle™ nur die Versorgung der absolut notwendigsten Steuerungs- und Kommunikationskomponenten aufrecht zu erhalten. In dieser Phase ist der Normalbetrieb erst nach einer Aufwachphase wieder aufzunehmen, die Steuerung und das OSR Shuttle™ befinden sich in einem Schlafmodus. Der Strombedarf sollte währenddessen doch deutlich unter ein Ampere sinken und somit den Energiespeicher nur geringfügig belasten.

Dieser Sleep-Modus kann vor allem bei Netzausfällen Abhilfe schaffen.

10.7.1.2 Rettungsshuttle und Parkbereich

Andere Ideen sind zum einen die Installation von Abschleppshuttles, die ausschließlich dazu dienen eventuell in der Anlage ausgefallene OSR Shuttle™ zu einem Ladepunkt zu bewegen. Diese Tätigkeit könnte auch von einer Person erledigt werden, was aber zu einer Abschaltung einer kompletten Gasse führen müsste, um die Personensicherheit gewährleisten zu können. Beim Einsatz eines Rettungsshuttles kann das restliche System mehr oder weniger normal weiterbetrieben werden.

Zum anderen könnte auch ein Parkbereich hilfreich sein. Darunter kann man sich einen eigenen Gassenabschnitt vorstellen, der mit einer Stromschiene ausgestattet ist. Wenn es nun zu Fehlern kommt, in denen das OSR Shuttle™ zwar nicht mehr zum ursprünglich angedachten Ladepunkt an der Übergabestelle am Lift kommt, sehr wohl aber noch zumindest in eben diesen Parkbereich bewegt werden kann, kann es dort solange verharren, bis der ordnungsmäßige Betrieb wieder aufgenommen werden kann. Beide Anregungen sind im Fall eines Netzausfalles nur bedingt eine Hilfe.

10.7.2 Sicherheitsabschaltung im Not-Halt Fall und bei Gassenbegehungen

Die unter Kapitel 10.7.1 beschriebenen Situationen betrachten nur Umstände in denen das OSR als ein durch einem Schutzzaun begrenzten Bereich betrieben wird. Es befindet sich keine Person innerhalb des Systems und es ist auch nicht notwendig, dass eine Person dieses betritt.

Anders verhält es sich wenn zum Beispiel durch die Betätigung eines Not-Halt der Stillstand des OSR Shuttle™ sichergestellt werden muss. Auch eine Begehung der Gasse erfordert eine sicherheitsgerichtete Abschaltung. Genau dieser Punkt stellt eine große Herausforderung dar. Derzeit ist eine sichere

Abschaltung verhältnismäßig einfach realisierbar, weil in den Fällen Not-Halt und Begehung die Spannungsversorgung der Stromschiene unterbrochen wird. Wenn nun aber diese physikalische Verbindung nicht mehr besteht, muss einzig und allein die Steuerung auf dem OSR Shuttle™ so ausgeführt sein, dass eine Abschaltung dem Sicherheitslevel entsprechend erzwungen und sichergestellt werden kann.

10.7.2.1 Safety-Level

Für das OSR Shuttle™ ergibt eine Risikoanalyse ein gefordertes Performance Level nach EN ISO 13849-1 von „d“. Das bedeutet bei der Planung einer geeigneten Steuerung sind gemäß genannter Norm folgende Aspekte zu beachten:

- Eine Schaltungskategorie 2, oder besser, muss abgebildet werden. Das bedeutet neben der Verwendung von bewährten Bauteilen und bewährten Sicherheitsprinzipien muss ein Testkanal berücksichtigt werden. Die Auswertung eines Fehlers durch diesen Testkanal muss notwendige Maßnahmen einleiten. Ein Fehler und der damit verbundene Verlust der Sicherheitsfunktion werden in diesem Fall zwar erkannt, aber unter Umständen erst nach erfolgter zyklischer Testung. Ein Schaltungsdesign nach Kategorie 3 würde ein zweikanaliges System fordern, was den Vorteil hat, dass auch bei Ausfall eines Kanals durch den verbleibenden zweiten Kanal die Sicherheitsfunktion aufrechterhalten bleibt.
- Der Diagnosedeckungsgrad (DC_{avg}) muss zumindest niedrig sein.
- Die gefahrbringenden Ausfallwerte ($MTTF_d$) der verwendeten Bauteile müssen je nach Schaltungslayout mittel bis hoch sein.

Kategorie	B	1	2	2	3	3	4
DC_{avg}	kein	kein	niedrig	mittel	niedrig	mittel	hoch
$MTTF_d$ jedes Kanals							
niedrig	a	nicht abgedeckt	a	b	b	c	nicht abgedeckt
mittel	b	nicht abgedeckt	b	c	c	d	nicht abgedeckt
hoch	Nicht abgedeckt	c	c	d	d	d	e

Abbildung 44: Tabelle 7 aus EN ISO 13849-1 zur Bewertung des erreichbaren Performance Levels, Quelle: EN ISO 13849-1.

10.8 Resümee und Vorschau für den Anwendungsfall am OSR Shuttle™

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass eine reine Akkumulator-Lösung unter anderem wegen der Masse, dem Volumen und vor allem wegen der schlechten zu erwartenden Lebensdauer unter KNAPP AG Bedingungen ausscheidet. Selbst eine akzeptierte Verschlechterung des Austauschintervalls auf beispielsweise einmal jährlich, würde noch immer eine Anzahl von zumindest 14 Stück bedeuten.

Sowohl eine reine Lösung mit Doppelschichtkondensatoren, als auch ein Hybridsystem sind vorstellbar. Wegen Gleichteilverwendung und dem geringeren Wartungsaufwand, sollte ein rein auf Superkondensatoren basierendes System leichte Vorteile gegenüber dem Hybriden haben. Zusätzlich sind

die Aufwände für Balanzierung, Überwachung und Kontrolle der Lade- und Entladevorgänge einfacher, weil sie nur für ein System umgesetzt werden müssen. Der Hybride hätte jedoch den Vorteil etwas besser an die erforderliche Ladungsmenge angepasst werden zu können. Das würde wiederum bedeuten, dass eventuell die Zusatzmasse und das Zusatzvolumen optimaler genutzt werden können. Zugleich kann man mit einer tolerierbaren Überdimensionierung gut die Anforderung an Ladezyklen und in weiterer Folge die zu erwartende Lebensdauer erhöhen. Hinzu kommt, dass man mit einem Hybridsystem eventuell eine bessere Fehlerbeherrschung erreicht. Weil der Akkumulator für einen ganztägigen Betrieb ausgelegt ist und nur die Steuerung versorgt, wären die Doppelschichtkondensatoren für die Dauer des Stillstandes unbelastet. Es würde theoretisch nur die Selbstentladerate schlagend. Innerhalb eines Tages sollten die meisten Fehler behoben werden können und das OSR Shuttle™ wieder den Normalbetrieb aufnehmen können. Sollte es sich um einen schwerwiegenderen Fehler handeln, wird ohnedies mit größeren Eingriffen zu rechnen sein.

Ein möglicher Kompromiss aus heutigen Systemen und dem Einsatz eines Energiespeichers mit nur einem Ladepunkt könnte sein, nur Teile eines Regals mit Stromschienen auszustatten und hier die Ladevorgänge während der Fahrt umzusetzen. Das würde bedeuten, dass der Energiespeicher kleiner ausgeführt werden kann. Zusätzlich könnte sogar die Gesamtzahl von OSR Shuttles™ in einem großen Regalsystem vielleicht reduziert werden, weil sich durch die eingesparte Ladezeit die verfügbare Zeit und somit der Durchsatz steigern würden.

Der große Vorteil eines modularen Regalsystems wird für den Einsatz eines Energiespeichers zugleich zum größten Problem. Die Vielzahl an möglichen Fahrstrecken ist schier unendlich und es ist somit ausschließlich der Warehouse-Management-Software überlassen die optimalen Wege unter Berücksichtigung des Ladezustandes zu berechnen.

Unter diesen Gegebenheiten ist es für eine endgültige Entscheidung, ob man das OSR Shuttle™ mit einer OnBoard Energieversorgung wirtschaftlich betreiben kann, unbedingt notwendig eine möglichst detaillierte Kostengegenüberstellung der bestehenden Lösung und einer Umstellung zu erarbeiten. Grundsätzlich ist ein neues Konzept vorstellbar. Der Kostenvergleich muss neben den Materialaufwänden der Systeme zusätzlich auch den Softwareaufwand wegen dem eventuell aufwendigeren Steuerungskonzept, als auch Aufwände für das Erreichen des geforderten Sicherheitslevels berücksichtigen. Als ersten Schritt empfiehlt es sich vorerst die Erstinstallation der neuen OSR Shuttle™ Generation abzuwarten, um daraus tatsächliche Energiebedarfe zu ermitteln und gegebenenfalls Korrekturen an den Berechnungsergebnissen aus dieser Arbeit vorzunehmen.

11 DETAILS ZUM OSR LIFT

Die gesamte Liftplattform wird mit einem Motor und einem Riemen vertikal bewegt. Auf einer Plattform befinden sich maximal zwei Motorrollen, sowie ein paar Lichtschranken zur Stauplatz- und Spaltkontrolle.

Die Erfassung der Sensoren sowie die Ansteuerung der Motorrollen (Fabrikat: Interroll, Type: EC310) erfolgt mittels dezentralem Busknoten, welcher in einem auf der Plattform befindlichen Schaltschrank installiert ist. Je nach Anforderung kann eine Liftplattform aus bis zu zwei einzelnen Plattformen aufgebaut sein. Das entspricht einer Granularität von ein oder zwei Behältern und bedeutet, es sind bis zu vier Motorrollen zu versorgen. Die Sensoren werden über den Busknoten versorgt, das heißt sie fallen bei der aktuellen Leistungsaufnahme kaum ins Gewicht. Der Energiespeicher soll nur die auf der Plattform montierten Komponenten versorgen, nicht den für die Hubbewegung erforderlichen Hauptantrieb!

11.1.1 Das OSR Lift Doppelspiel

Während des Durchlaufs eines Doppelspiels wird über die Motorrollen ein Behälter an der Übergabestelle und dem Anschlusspunkt an die Fördertechnik ein Behälter übernommen. Ist der Behälter auf der Plattform positioniert, startet die vertikale Fahrt. Diese endet in einer Ebene, um dort den Behälter wiederum an das OSR Shuttle™ abzugeben. Anschließend erfolgt die Weiterfahrt zu einer anderen Ebene, wo es nun wieder zu einer Behälteraufnahme kommt. Zuletzt bewegt sich die Liftplattform wieder zur Übergabestelle an die Fördertechnik und gibt dort den Behälter ab. Die erforderliche Dauer dieser Behälterübergabe ergibt sich aus der Ausführung der Liftplattform(en). Während der Bewegung in vertikaler Richtung stehen die Motorrollen still, das bedeutet nur an den Übergabepositionen kommt es zu kurzzeitigen Spitzenbelastungen. Für die restliche Dauer ist der Busknoten als elektrische Last zu berücksichtigen. Zusätzlich ist der Leerlaufstrom der Motorrollen zu beachten.

Elektrische Daten	
Nennspannung	24 V DC
Kurzzeitig zulässiger Spannungsbereich	18 bis 28 V DC
Leerlaufstrom	0,4 A
Nennstrom	2,0 A
Max. Anlaufstrom	5,0 A

Abbildung 45: Elektrische Daten der EC310 Motorrolle, Quelle: Datenblatt von Interroll (Hrsg.).

Die erwähnten Verbraucher werden ausschließlich mit 24 VDC betrieben.

11.1.2 Zyklenzahl und Durchsatz

Bei bestehenden Anlagen ist je OSR Gasse ein Lift vorhanden, der alle Ebenen dieser Gasse bedient. Bei der neusten OSR Generation muss es nicht mehr diese 1:1 Situation geben. Es ist davon auszugehen, dass einem Lift mehrere Gassen gegenüberstehen. Das bedeutet zugleich, an die Geschwindigkeit, aber auch an die Zuverlässigkeit dieses Nadelöhrs werden hohe Ansprüche gestellt und die Zyklenzahl ist damit wesentlich höher als jene des OSR Shuttle™.

Während sich der Durchsatzwert bezüglich OSR Shuttle™ klar festlegen lässt, verhält es sich durch die variable Gestaltung des neuen OSR beim Lift etwas anders. Dessen Durchsatz hängt direkt mit der

Ausführung des OSR zusammen, umso höher dieses gebaut wird, desto größer ist die zurückzulegende Wegstrecke und umso geringer der mögliche Durchsatz. Zugleich wirkt sich die Wegstrecke eventuell auf die Zeit, die zwischen den Ladevorgängen verstreicht, aus.

Für weitere Betrachtungen und für die Ermittlung des Energiebedarfs werden Festlegungen getroffen:

- Die Dauer einer Fahrt vom Ladepunkt zur oberen Endlage der Hubachse und wieder zurück beträgt 15 s. Unter Berücksichtigung von Beschleunigungs- und Bremsvorgängen, sowie der Geschwindigkeit von 7 m/s, würde das einer Ausdehnung von etwa 40 m Höhe entsprechen und somit die zu erwartenden Anforderungen mit Gewissheit abdecken.
- Zusätzlich ist die erforderliche Zeit der drei Behälterübergabeprozesse im Laufe eines Doppelspiels zu berücksichtigen. Drei deswegen, weil an der Übergabestelle zur Fördertechnik zugleich ein Behälter abgegeben und aufgenommen werden kann. Eine realistische Gesamtdauer von gerundeten 30 s für ein Doppelspiel ist für die Dimensionierung des Energiespeichers vertretbar. Die Zeit hier etwas höher anzusetzen als unter Umständen tatsächlich erforderlich wirkt sich bei der Dimensionierung des Energiespeichers ohnehin positiv aus, weil das einer Überdimensionierung entspricht.
- Obwohl sich der Lift zumindest während der Behälteraufnahme und -abgabe an die Fördertechnik in der Ladestation befindet und auch geladen werden könnte, wird für die Berechnung des Energiespeichers diese Tatsache nicht berücksichtigt. Die Gründe dafür sind, dass bereits mit dieser Festlegung eine Akkumulator-Lösung wegen der enorm hohen Zyklenzahl ungeeignet wäre und nicht weiter untersucht werden müsste.

Basierend auf den Ergebnissen der Auslegung eines geeigneten Energiespeichers für das OSR Shuttle™, wird beim Lift ebenfalls für den Fall eines Lithiumionensystems eine Lösung angestrebt, die für einen ganztägigen Betrieb geeignet ist. Zudem ist der Zeitanteil wo sich der Lift an der Übergabestelle befindet im Vergleich zur restlichen Dauer eines Doppelspiels verschwindend gering und ergibt bei der Energieberechnung keinen wesentlichen Vorteil. Aus diesen Angaben ergibt sich unter Berücksichtigung des Schichtmodells bei 16 Arbeitsstunden eine höchstmögliche Anzahl von 1920 Zyklen.

11.2 Erhebung des Energiebedarfs

Um den erforderlichen Energiebedarf ermitteln zu können, wurden Messungen durchgeführt damit das Verhalten der Motorrollen unter Belastung festgestellt werden kann um so eine möglichst präzise Stromaufnahme im Verlauf einer Behälterübergabe zu erhalten. Eine Motorrolle wird dabei mit 10 Slave-Rollen über Riemen verbunden.



Abbildung 46: Symbolbild Slave-Rollen mit PolyVee Riemen, Quelle: Interroll (2017), Onlinequelle [08.11.2017].

Genauere Betriebsparameter zu definieren ist im Fall der Liftplattform schwierig, weil es viele Einflussfaktoren gibt die das Betriebsprofil der Motorrollen mitbestimmen und diese von Anlage zu Anlage voneinander abweichen. Dazu zählen unter anderem:

- Die Geschwindigkeit der angrenzenden Fördertechnik.
- Die Behältergrößen, weil diese die erforderliche Länge der Liftplattform bestimmen. In Abhängigkeit der Länge variiert die zurückzulegende Strecke, was zugleich Auswirkungen auf die Beschleunigungsphase, die Fahrt mit Sollgeschwindigkeit und die Bremsphase hat.
- Die Behältermasse wirkt sich ebenso auf die Beschleunigungsphase, die Fahrt mit Sollgeschwindigkeit und die Bremsphase aus.

Um hier genügend Spielraum zu haben, wurde bei der Messung eine Masse von 50 kg beschleunigt.

Des Weiteren wurde um die gewünschte Geschwindigkeit zu erreichen eine Getriebeuntersetzung von 16:1 gewählt. Daraus resultieren wiederum ein gewisses Anlaufmoment und der Anlaufstrom.

Getriebe- untersetzung	Max. Förder- geschwindigkeit m/s
9:1	1,75
12:1	1,31
16:1	0,98
20:1	0,79
24:1	0,65
36:1	0,44
48:1	0,33
64:1	0,25
96:1	0,16

Abbildung 47: Übersetzung und Geschwindigkeit der EC310 Motorrolle, Quelle: Datenblatt von Interroll.

$$P = 2\pi Mn \tag{11.1}$$

P/W Leistung

M/Nm Drehmoment

n/s^{-1} Drehzahl

11.2.1 Messung im Stillstand

Im Vergleich zu den Angaben im Datenblatt ergab eine Messung im Stillstand einen mittleren Leerlaufstrom von nur 30 mA. Weil dieser Wert doch deutlich unter jenem laut Datenblatt liegt und nicht davon ausgegangen wird, dass alle Motorrollen einen so geringen Leerlaufstrom aufweisen, wird für die Berechnung der Wert gemäß Herstellerangaben herangezogen.

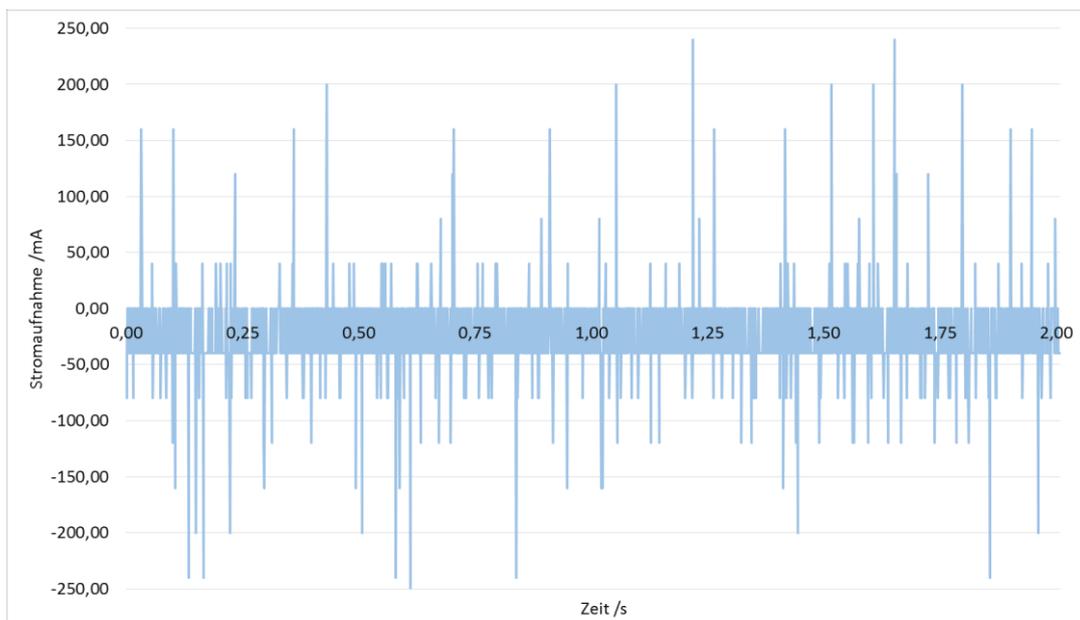


Abbildung 48: Leerlaufstrom der EC310, Quelle: Eigene Darstellung basierend auf KNAPP AG Messungen.

11.2.2 Messung mit 50 kg Last – Beschleunigung

Gemäß den elektrischen Daten beträgt der Anlaufstrom der EC310 maximal 5 A. Diese Angabe ist insofern für die Berechnungszwecke unvollständig, weil nicht definiert ist welche Dauer dieser Anlauf beansprucht. Außerdem handelt es sich beim Wert laut Datenblatt um einen Maximalwert. Faktoren wie der Einfluss der Getriebeuntersetzung, die Beschleunigungsrampe und die Anzahl der Slave-Rollen ist nicht berücksichtigt. Aus diesem Grund ist eine Messung unter realen Bedingungen notwendig, um sich ein aussagekräftiges Bild hinsichtlich Stromaufnahme zu machen.

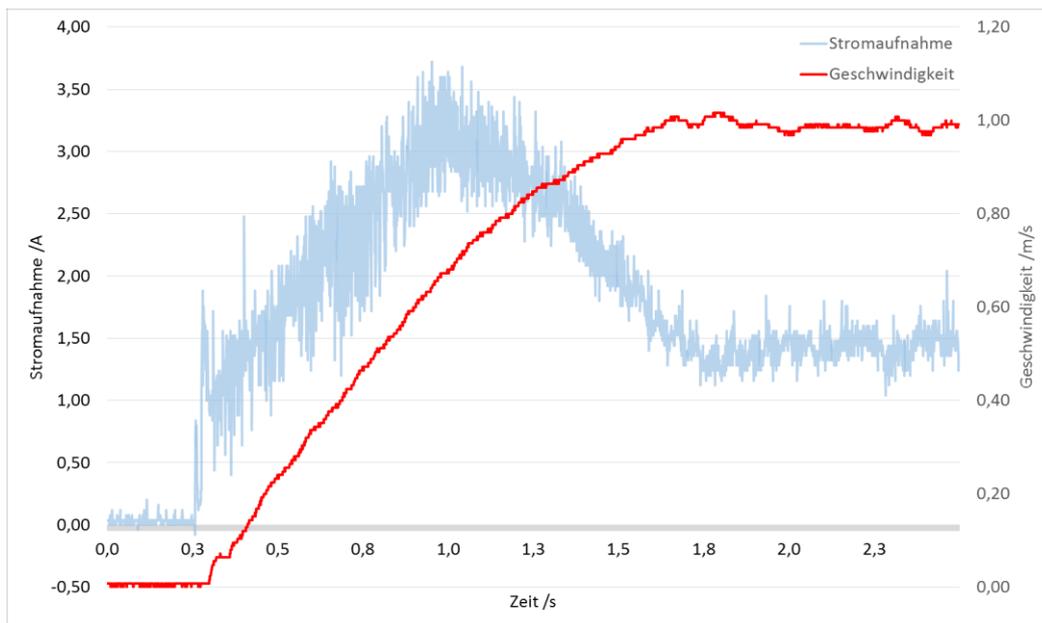


Abbildung 49: Stromaufnahme der EC310 während der Beschleunigung, Quelle: Eigene Darstellung basierend auf KNAPP AG Messungen.

Unter den gegebenen Umständen und der KNAPP AG Konfiguration liegt der Spitzenstrom bei 3,72 A. Es ergibt sich ein Mittelwert von 2,17 A über die Beschleunigungsdauer von 1,5 s. Wenn die Sollgeschwindigkeit erreicht ist, reduziert sich die mittlere Stromaufnahme während einer Fahrt mit konstanter Geschwindigkeit auf 1,42 A.

11.2.3 Messung mit 50 kg Last – Bremsen

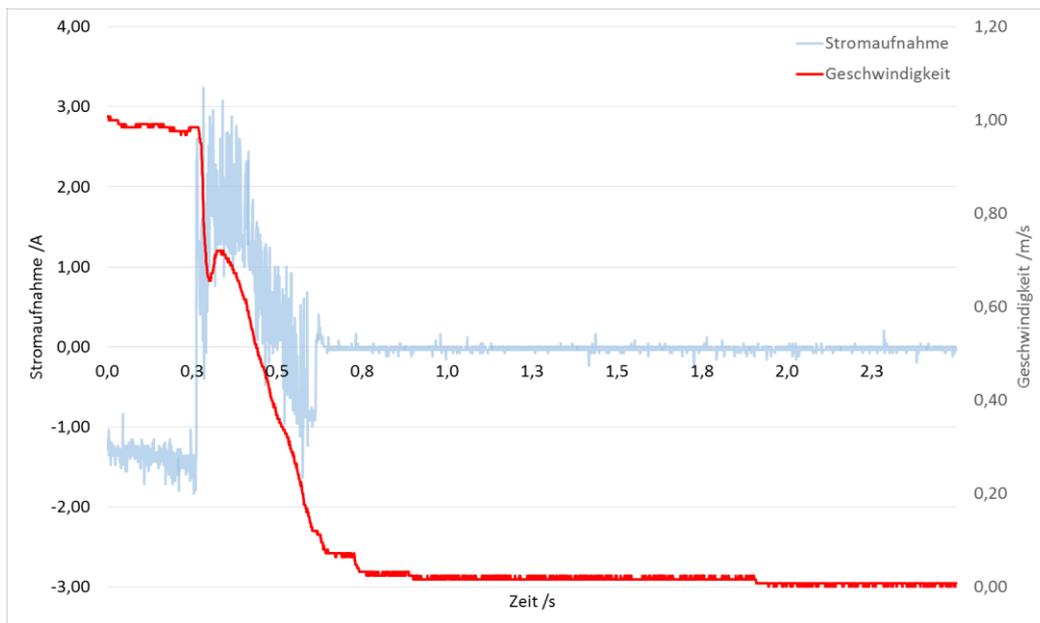


Abbildung 50: Stromaufnahme der EC310 während des Bremsens, Quelle: Eigene Darstellung basierend auf KNAPP AG Messungen.

Um die zuvor beschleunigte Masse im Anschluss an eine Fahrt mit konstanter Geschwindigkeit wieder bremsen zu können, ist das notwendige Bremsmoment zu generieren. Hierfür steigt die Stromaufnahme zu Beginn der Bremsphase sprungartig auf einen Maximalwert von 3,24 A und nimmt dann stetig für eine Dauer von rund 0,4 s ab. Daraus lässt sich letztendlich ein Mittelwert von 1,12 A ermitteln.

11.2.4 Energiebedarf eines Doppelspiels

Die durchgeführten Messungen erheben und beschreiben nur den Stromverlauf einer Motorrolle. Für den gesamten Energiebedarf soll jedoch eine Anzahl von vier Motorrollen berücksichtigt werden. Damit unnötige Stromspitzen bestmöglich verhindert werden starten nur zwei davon zugleich, damit wird ein Stellplatz bearbeitet. Erst wenn diese beiden ihren Stromspitzenwert überschritten haben, wird die zweite Plattform mit weiteren zwei Motorrollen gestartet. Dieser Zeitverzug beträgt etwa 0,7 s.

Eine Abschätzung der möglichen Stromaufnahme unter diesen Voraussetzungen ist in Abbildung 51 dargestellt. Die Betonung liegt hierbei auf „möglich“, weil dieser Verlauf auf die Annahme gestützt ist, dass sich alle vier Motorrollen exakt gleich verhalten und der Zeitverzug genau die bereits erwähnten 0,7 s beträgt. Minimale Abweichungen zur Praxis sind deswegen zulässig, weil für den Energiespeicher ohnedies die Ladungsmenge relevant ist und diese auf die Zeit bezogen ermittelt wird.

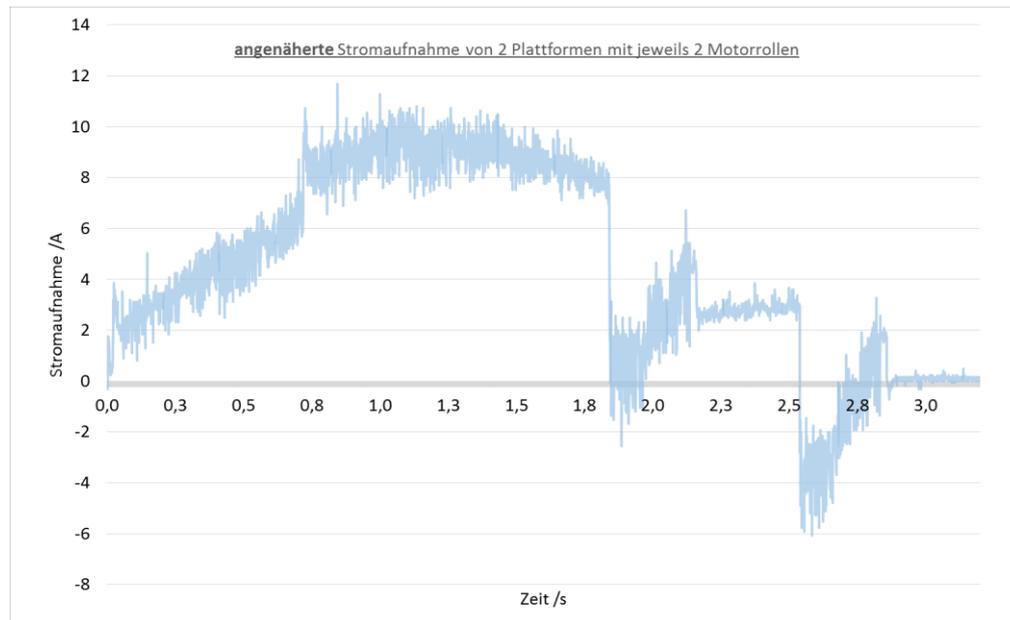


Abbildung 51: Angenäherter Stromverlauf von 2 Plattformen, Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an KNAPP AG Messungen.

Eine zusätzliche Erkenntnis aus den Messungen und dieser Auswertung ist die vorhersehbare Dauer von 2,9 s für die Behälterübergabe von zwei Plattformen. Diese bildet keinen Konflikt mit Annahme von 30 s für ein gesamtes Doppelspiel (siehe auch Kapitel 11.1.2).

Summa summarum ergibt sich somit:

- Für die Dauer der Behälterübergabe beträgt die mittlere Leistungsaufnahme 128 W.
- Für die verbleibende Dauer von 21 s, bezogen auf die Gesamtdauer von 30 s, ist mit der vierfachen Leerlaufleistung laut Datenblatt zu rechnen, sprich knapp 40 W.
- Über die vollständigen 30 s ist der Leistungsbedarf des Busknotens und der Lichtschranken mit 30 W zu berücksichtigen.
- Für ein gesamtes Doppelspiel ist eine Energiemenge von knapp 2900 Ws erforderlich.

11.3 Ausführung mit Doppelschichtkondensatoren

Aus Gründen der Gleichteilverwendung soll bei dieser Ausführungsvariante der gleiche Doppelschichtkondensator wie bereits beim OSR Shuttle™ eingesetzt werden. Selbstverständlich sind auch die gleichen Gesetzmäßigkeiten gültig, die im Vorfeld aufgezeigt wurden und hier nicht mehr detailliert angeführt werden.

Weil für die Betriebsmittel der Liftplattform eine Betriebsspannung von 24 VDC ausreichend, beziehungsweise eine Spannungsbereich von 28 VDC bis 20 VDC zulässig ist, kann eine Serienschaltung von 10 Superkondensatoren hierfür in Betracht gezogen werden. Ein solches Pack hat eine Gesamtkapazität von 36,1 F. Unter Berücksichtigung der höchstzulässigen Spannung von 28 VDC entspricht das einem Energiegehalt von 14151,2 Ws, was ausreichend ist um auch nach dem Doppelspiel eine Spannung von 25 VDC bereitzustellen. Um aber überhaupt erst die 28 VDC generieren zu können, ist es wieder notwendig mittels DC-DC-Konverter die verfügbare Spannung der Netzgeräte entsprechend zu erhöhen. Sollte man diesen einsparen und mit den 24 VDC der Netzgeräte arbeiten, würde sich die

Restspannung nur äußerst knapp über der notwendigen 20 VDC Marke einstellen. Von dieser grenzwertigen Auslegung ist abzuraten. In diesem Fall kann durch die Parallelschaltung eines zweiten Packs Abhilfe geschaffen werden.

Auch anzumerken ist, dass sich vor allem wegen der Möglichkeit bei der Übergabe an die Fördertechnik zugleich den Energiespeicher mit 40 A zu laden, die entnommene Ladungsmenge von 120 As ohne zusätzliche Wartezeit nachladen lässt. Unter Berufung auf die 500000 Zyklen laut Datenblatt und den maximal 1920 täglichen Zyklen ist ein Austausch der Doppelschichtkondensator-Packs einmal jährlich zu erwarten.

Beide Varianten sind denkbar. Die Auswirkungen auf die Leistungsanforderung des Hubantriebes sind marginal und somit vernachlässigbar. Die Masse eines Packs mit 10 Doppelschichtkondensatoren beträgt weniger als 0,75 kg. Die Abmessung eines Packs ist mit etwa 200 x 120 x 70 mm auch überschaubar.

11.4 Ausführungen mit einem Lithiumionensystem

Wegen der sehr hohen Zyklenzahl lässt sich schon vorweg vermuten, dass eine kundenfreundliche, wartungsarme Variante mit einem Lithiumionensystem als Energiespeicher kaum umsetzbar scheint. Eine Aufladung nach jedem Zyklus ist nicht zweckmäßig. Es soll durch eine Berechnung zumindest überprüft werden, wie man einen Tagesbetrieb realisieren könnte. Auch hier wird mit den Eigenschaften des bereits im Zuge des OSR Shuttle™ herangezogenen Akkumulators gearbeitet.

Bei einem Energiebedarf von 2900 Ws je Zyklus ergibt sich bei 1920 Tageszyklen ein Gesamtenergiebedarf von 1550 Wh. Wie schon erwähnt ist eine bestmögliche Lebensdauer des Akkumulators nur erreichbar, wenn dieser maximal zu 80 % entladen wird. Zusätzlich darf der in Abbildung 43 dargestellte, altersbedingte Kapazitätsverlust nicht vernachlässigt werden. Wenn diese beiden Aspekte in die Dimensionierung zusätzlich einfließen, ergibt sich aus dem Energiegehalt eines Akkumulators eine Mindeststückzahl von 8 Stück!

Diese Stückzahl kann unter anderem weder was Masse und Volumen betrifft, noch preislich, mit den Doppelschichtkondensatoren mithalten.

11.5 Ausführungen mit einem Hybridsystem

Weil theoretisch bereits ein Superkondensator-Pack ausreicht um ein Doppelspiel zu versorgen, ist es unnötig einen zusätzlichen Energiespeicher vorzusehen. Eine Trennung von Steuerung und Leistung wie beim OSR Shuttle™ ist im Fall der Liftplattform nicht umsetzbar, beziehungsweise würde das nur in Verbindung mit unnötigem Aufwand ermöglicht werden können. Alles arbeitet mit der gleichen 24 VDC Versorgung, beziehungsweise wird über den Busknoten mitversorgt. Basierend auf diesen Tatsachen und den gewonnenen Erkenntnissen, ist eine Hybridlösung derzeit nicht zielführend und wird nicht weiter untersucht.

11.6 Zusätzliche Aufgabenstellung bei Einsatz eines Energiespeichers auf der Liftplattform

Wie beim OSR Shuttle™ ist auch im Falle des Liftbetriebes davon auszugehen, dass dieser nicht immer seinen Ladepunkt erreicht und zumindest der Busknoten auf der Liftplattform permanent betrieben wird. Das bedeutet zugleich, dass der Energiespeicher immer eine Mindestlast versorgen muss. Die Tatsache, dass zumindest der Hubantrieb immer zugänglich ist und bei aufrechter Versorgung theoretisch betrieben werden kann, erleichtert diese Problemstellung nicht. Es muss immer der Zustand der Sensoren und darüber hinaus die Position eines Behälters bekannt sein. Sollte nämlich ein Behälter nicht korrekt positioniert worden sein und eventuell über die Plattform ragen, kann das zu einer Behälterklemmung und zu einem Absturz des Behälters führen. Deswegen sind die Fehlerfälle wieder gesondert zu betrachten.

11.6.1 Prozess- und Systemfehler

Weil der Lift an das OSR gekoppelt ist sind grundsätzlich die gleichen Fehlerszenarien vorstellbar. Zu den möglichen Ursachen können unter anderem wieder zählen:

- Netzausfall;
- Defekte Komponenten;
- Behälterstau und Prozessfehler;

Netzausfall: Ein Netzausfall hat den unmittelbaren Stillstand des Hubwerkes zur Folge. Das bedeutet zugleich, Plattform(en) können an einer beliebigen, zufälligen Position entlang der Hubachse verharren. Selbst wenn eine Plattform genau an der Übergabeposition zu einer OSR Ebene stehen würde, darf eine Behälterabgabe keinesfalls stattfinden, weil die abziehende Fördertechnik bei Netzausfall stillsteht und den Behälter nicht übernehmen kann. Im Idealfall erfolgt eine Behebung des Netzausfalls noch in jener Zeit, solange der Energiespeicher zumindest die Versorgung des Busknoten aufrechterhalten kann. Das erleichtert einen Wiederanlauf insofern, weil die Sensorzustände bekannt sind und man weiß ob sich ein Behälter auf der Plattform befindet, beziehungsweise ob eventuell genau in der Übergabephase der Stillstand eingeleitet wurde. Anhand des IO-Abbildes kann dann entschieden werden, wie bei einem Wiederanlaufprozedere vorgegangen werden muss. Schwieriger ist die Situation, wenn der Netzausfall länger dauert und es auch zum Ausfall des Busknoten kommt. Dann weiß man auch bei Wiedereinschalten der Stromversorgung nichts über den Zustand der Sensoren auf der Plattform. Erforderliche Maßnahmen, die vor Wiederanlauf zu ergreifen sind, müssen definiert werden!

Defekte Komponente: Je nachdem welche Komponente ausfällt, ist das entsprechend bei der Steuerung der Plattform zu bedenken. Sollte es zu einem Ausfall des Hubantriebes kommen und die Plattform nicht zurück an den Einspeisepunkt geführt werden können, decken sich die Szenarien mit jenen eines Netzausfalls. Für auf der Plattform befindliche Bauteile, muss jeder Ausfall und dessen Konsequenz separat betrachtet werden um Fehlerbehebungsmaßnahmen zu definieren.

Behälterstau und Prozessfehler: Sollte es durch einen Prozessfehler nicht möglich sein einen Behälter an eine OSR Ebene oder die abziehende Fördertechnik zu übergeben, empfiehlt es sich den Einspeisepunkt erst gar nicht zu verlassen. Dann würde die Spannungsversorgung aufrecht erhalten bleiben und sich ein Wiederanlauf nach Fehlerbehebung einfacher gestalten. Kommt es während der Fahrt zu einem

Prozessfehler, muss die Steuerung entscheiden ob die Plattform an einer Stelle verharren muss, oder ob es möglich ist noch zurück an den Aufladepunkt bewegt zu werden. Sollte ersteres der Fall sein, kann je nach Dauer der Betriebsunterbrechung unter Umständen der Normalbetrieb einfach wieder aufgenommen werden. Sollte der Busknoten bereits ausgefallen sein, sind die gleichen Maßnahmen wie nach Netzausfall zu berücksichtigen.

11.6.2 Sicherheitsabschaltung im Not-Halt Fall und bei Begehungen

Wie auch schon in Kapitel 10.7.2 hinlänglich erklärt, ist neben dem Not-Halt Fall auch der Bedarf einer Liftbegehung im Zuge der Planung zu berücksichtigen. Das bedeutet einerseits, es muss der Hubantrieb sicherheitsgerichtet stillgesetzt werden, andererseits müssen auch die Motorrollen sicher gestoppt werden. Damit muss gewährleistet werden, dass die Motorrollen keinen Behälter ausschleusen können.

11.6.2.1 Safety-Level

Genaugenommen wird bei der Risikoanalyse des Lifts dieser in zwei Teilen zerlegt betrachtet. Zum einen ist die Hubachse zu bewerten, zum anderen die Gefahr welche die Plattform selbst birgt. Während der Hubantrieb ohne Zweifel mit einer steuerungstechnischen Schutzmaßnahme die Performance Level „d“ nach EN ISO 13849-1 erreicht abzuschalten ist, ist das Gefahrenpotential der Plattform selbst deutlich geringer und könnte mit einer Steuerung gemäß Performance Level „c“ zufriedenstellend gesichert werden. Da es nicht immer sichergestellt werden kann, dass zum Beispiel durch die Ausführung des Liftschachtes ein Abstürzen eines Behälters unterbunden wird, resultiert daraus im Gesamten betrachtet letztendlich auch für die Plattform ein gefordertes Performance Level von „d“. Das hat zugleich den Vorteil, dass man prinzipiell für das OSR Shuttle™ und die Liftplattform, hinsichtlich des Einsatzes eines Energiespeichers, grundsätzlich für den Bereich der funktionalen Sicherheit die gleiche Steuerung planen kann.

11.7 Resümee und Vorschau für den Anwendungsfall auf der Liftplattform

Der Einsatz eines Energiespeichers auf der Liftplattform gestaltet sich trotz der recht simpel scheinenden Anwendung nicht weniger anspruchsvoll, als beim OSR Shuttle™. Ausgehend von den aktuell verfügbaren Akkumulator-Technologien, scheiden Lithiumionensysteme noch aus. Sollten Prognosen stimmen und man Systeme mit höheren Zyklenzahl und verbesserter Energiedichte zeitnah serienreif herstellen können, sollte der Einsatz eventuell nochmal geprüft werden. Heute stellt für diese KNAPP AG Anwendung nur der Einsatz eine Doppelschichtkondensator Lösung eine vernünftige Möglichkeit dar.

Ähnlich dem OSR Shuttle™ sollte der nächste Schritt sein, eine sehr detaillierte Kostenaufstellung des bestehenden Systems einer Umstellung auf einen OnBoard Energiespeicher gegenüberzustellen. Neben den schon erwähnten Themen sollte auch im Punkt Kommunikation mit der Steuerung nach Lösungsansätzen gesucht werden, die zum einen möglichst energiearm sind, zugleich unbedingt den geforderten Ansprüchen an die Sicherheit gerecht werden. In jedem Fall empfiehlt es sich bei der Aufwandsabschätzung hinsichtlich Energiespeicherung zu beachten, dass man bei Gleichteilverwendung unter Umständen einiges zugleich beim OSR Shuttle™ verwenden kann. Somit würden sich die

Entwicklungskosten zumindest teilweise auf die beiden Anwendungen aufteilen. Das ist de facto ein Grund, der für den Einsatz gleicher Technologien sprechen würde.

Um abschließend noch kurz eine Anregung bezüglich Kommunikation anzubringen: Als eine mögliche Variante für die Anbindung des Busnotens könnte beispielsweise ein Leckwellenleiter herangezogen werden, der durch eine gerichtete Wellenausbreitung ein zuverlässiges Feld generiert, das auch für industrielle Lösungen geeignet scheint. Systeme dieser Art sind bereits am Markt verbreitet.

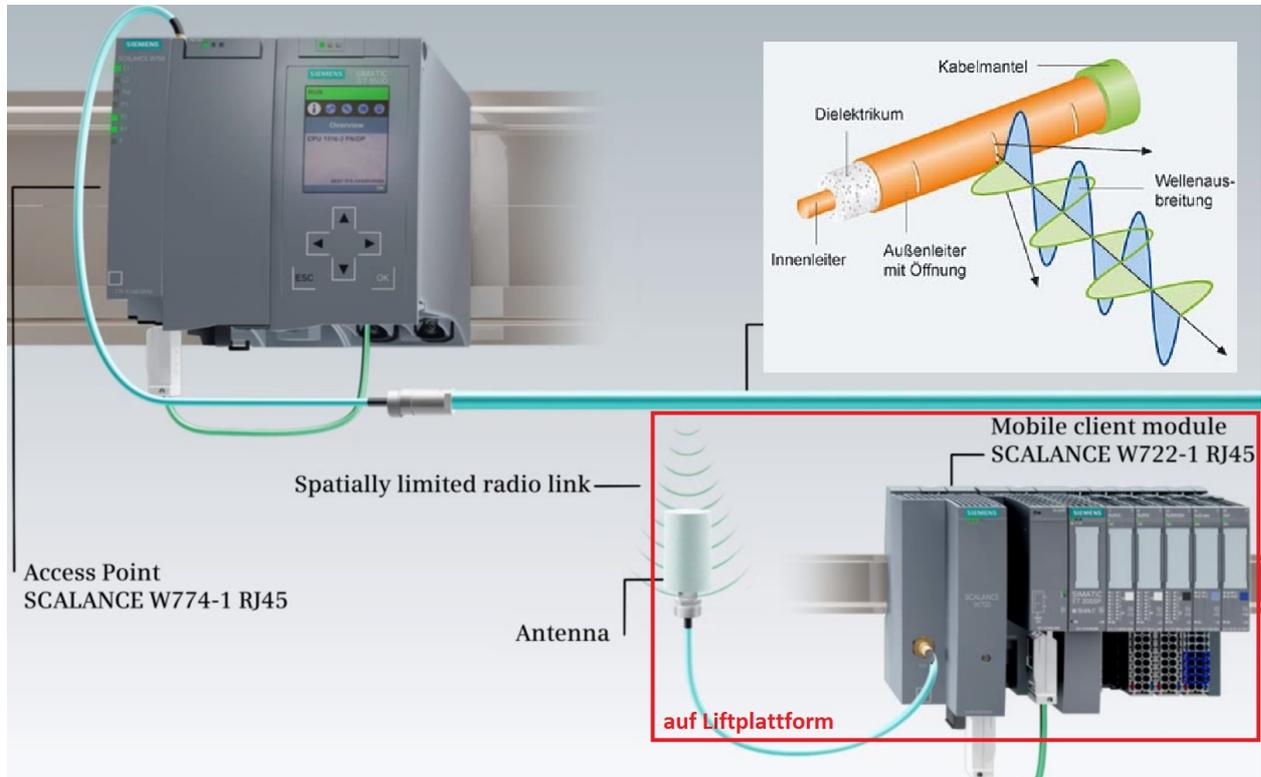


Abbildung 52: Symbolbild eines RCOAX Systems für industrielle WLAN Anwendungen mit Leckwellenleiter, Quelle: Siemens (2017), Onlinequelle [09.11.2017] (leicht modifiziert).

Eine andere Möglichkeit könnte eine Datenlichtschranke sein, hier ist aber die Verschmutzung durch Staub oder andere Fremdkörper wegen der vertikalen Ausrichtung zu bedenken. Eventuell kann im Zuge einer Testanlage das Verhalten geprüft werden, sofern bei KNAPP AG nicht ohnedies schon Referenzen diesbezüglich vorliegen.

LITERATURVERZEICHNIS

Gedruckte Werke

Jossen Andreas; Weydanz, Wolfgang (2006): *Moderne Akkumulatoren richtig einsetzen*, 1. Auflage, Ubooks Verlag, Neusäß

Korthauer, Reiner (Hrsg.) (2013): *Handbuch Lithium-Ionen-Batterien*, Springer Vieweg, Berlin/Heidelberg

Kurzweil, Peter; Dietlmeier Otto K. (2015): *Elektrochemische Speicher – Superkondensatoren, Batterien, Elektrolyse-Wasserstoff, Rechtliche Grundlagen*, Springer Vieweg, Wiesbaden

Liebscher, Fritz; Held, Wolfgang (1968): *Kondensatoren – Dielektrikum Bemessung Anwendung*, Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg

Reddy, Thomas B. (Hrsg.) (2014): *Linden's Handbook of Batteries*, 4th Edition, McGraw Hill

Schulz, Dieter (2014): *Akkus und Ladetechniken – Das Praxisbuch für alle Akku-Typen, Ladegeräte und Ladeverfahren*, Franzis Verlag, München

Tschöke, Helmut (Hrsg.) (2014): *Die Elektrifizierung des Antriebsstrangs – Basiswissen*, Springer Vieweg, Wiesbaden

Online-Quellen

Interroll (2017)

<https://www.interroll.de/produkte/foerderrollen/foerderrollenzubehoer/polyvee-riemen/> [Stand 08.11.2017]

KNAPP AG (2017)

<https://www.knapp.com/unternehmen/unternehmenskultur/> [Stand 28.04.2017]

Siemens (2017)

<http://w3.siemens.com/mcms/industrial-communication/en/industrial-wireless-communication/iwlan-industrial-wireless-lan/pages/video-rcoax-en.aspx> [Stand 09.11.2017]

Universität Ulm (2017)

https://www.uni-ulm.de/fileadmin/website_uni_ulm/nawi.inst.251/Didactics/Geschichte_der_Elektrochemie/mittel/leiden.html [Stand 07.08.2017].

Sonstige Quellen

EN ISO 13849-1: *Sicherheit von Maschinen – Sicherheitsbezogene Teile von Steuerungen, Teil 1: Allgemeine Gestaltungsleitsätze*, Ausgabe: 2009-09-01

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: KNAPP AG Logo, Quelle KNAPP AG (Hrsg.).....	1
Abbildung 2: Systemübersicht OSR Gasse, Quelle: KNAPP AG (Hrsg.).....	3
Abbildung 3: Systemübersicht OSR Shuttle, Quelle: KNAPP AG (Hrsg.).....	3
Abbildung 4: Systemübersicht OSR Lift, Quelle: KNAPP AG (Hrsg.).....	4
Abbildung 5: Übersicht diverser Energieumwandlungen nach Eduard W. L. Justi, Quelle: Kurzweil/Dietlmeier (2015), S. 6 (leicht modifiziert).	6
Abbildung 6: Übersicht von Zeitbereich/Leistung/Energiedichte diverser Energiespeicher, Quelle: Kurzweil/Dietlmeier (2015), S. 3.....	7
Abbildung 7: Vergleich von Speichern, Quelle: Kurzweil/Dietlmeier (2015), S. 20.....	8
Abbildung 8: Voltasche Säule, Quelle: Jossen/Weydanz (2006), S. 1.....	10
Abbildung 9: Prinzipieller Aufbau eines elektrochemischen Speichers, Quelle: Jossen/Weydanz (2006), S. 5.....	11
Abbildung 10: Ionenfluss bei Entladen einer Zelle, Quelle: Schulz (2014), S. 14.....	13
Abbildung 11: Leydner Flasche, Quelle: Uni Ulm (2017), Onlinequelle [07.08.2017].....	14
Abbildung 12: Patentierte Doppelschichtkondensatoren: a. H. I. Becker (US 2800616), b. R. A. Rightmire (US 3288641), c. Matsushita (EP 0449145), Quelle: Kurzweil/Dietlmeier (2015), S. 24.....	16
Abbildung 13: Leistungsdaten von Batterien und Kondensatoren, Quelle: Kurzweil/Dietlmeier (2015), S. 27 (leicht modifiziert).	19
Abbildung 14: Ersatzschaltbild elektrochemischer Zelle(n), Quelle: Jossen/Weydanz (2006), S. 16.....	20
Abbildung 15: Selbstentladung in Abhängigkeit der Temperatur, Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Werte von Jossen/Weydanz (2006), S. 21.....	21
Abbildung 16: Spannungs- und Temperaturverlauf bei CC-Ladeverfahren mit Abschaltung, Quelle: Jossen/Weydanz (2006), S. 178 (leicht modifiziert).....	24
Abbildung 17: Gepulster Konstantstrom und Ladung, Quelle: Schulz (2014), S. 123 (leicht modifiziert)..	25
Abbildung 18: CC-CV-Ladung mit Abschaltung am Beispiel eines Bleiakкумуляtors, Quelle: Jossen/Weydanz (2006), S. 200.....	27
Abbildung 19: IUI-Ladung mit Abschaltung am Beispiel eines Bleiakкумуляtors, Quelle: Jossen/Weydanz (2006), S. 201.....	28
Abbildung 20: Typischer Verlauf von Ladestrom und Spannung bei W-Ladung, Quelle: Jossen/Weydanz (2006), S. 203.....	28
Abbildung 21: Typische Entladekurve eines Bleiakкумуляtors, Quelle: Jossen/Weydanz (2006), S. 49..	32

Abbildung 22: Typische Entladekurve eines Bleiakкумуляtors (1,3 Ah, 6 V) mit unterschiedlichen Entladeströmen bei 20 °C, Quelle: Jossen/Weydanz (2006), S. 50.	32
Abbildung 23: Typischer Spannungsverlauf und spezifische Kapazität eines Bleiakкумуляtors bei Entladen und Laden mit konstantem Strom, Quelle: Reddy (Hrsg.) (2014), S. 16.10.	33
Abbildung 24: Abhängigkeit der Lagerungsdauer von Lagerungstemperatur bis 50 %iger Selbstentladung, Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Werte von Schulz (2014), S. 42.	34
Abbildung 25: Typischer Ladeverlauf eines Lithiumionensystems mit Vorladephasen, Quelle: Jossen/Weydanz (2006), S. 194 (leicht modifiziert).	43
Abbildung 26: Entladekurve eines 17 Ah, 3,7 V Lithiumakkumulators in Abhängigkeit der C-Rate (li.) und bei 0,5 C in Abhängigkeit der Temperatur (re.), Quelle: Kurzweil/Dietlmeier (2015), S. 225 (leicht modifiziert).	44
Abbildung 27: Prinzipschema eines Batterie-Management-Systems, Quelle: Kurzweil/Dietlmeier (2015), S. 238.	46
Abbildung 28: Zusammenhang von SOC, SOH und SOF, Quelle: Korthauer (Hrsg.) (2013), S. 178.	46
Abbildung 29: Potentialverteilung an einer positiv geladenen Elektrode, Quelle: Reddy (Hrsg.) (2014), S. 2.14.	49
Abbildung 30: Typischer Aufbau eines Doppelschichtkondensators, Quelle: Kurzweil/Dietlmeier (2015), S. 33.	50
Abbildung 31: Vereinfachtes Ersatzschaltbild eines Superkondensators, Quelle: Tschöke (Hrsg.) (2014), S. 71.	51
Abbildung 32: Spannungsverlauf bei Konstantstromladung, Quelle: Tschöke (Hrsg.) (2014), S. 71 (leicht modifiziert).	52
Abbildung 33: Widerstands- und Kapazitätsentwicklung von Doppelschichtkondensatoren, Quelle: Tschöke (Hrsg.) (2014), S. 73 (leicht modifiziert).	53
Abbildung 34: Bewegungen während eines Doppelspiels, Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an KNAPP AG OSR Layout.	60
Abbildung 35: Möglicher Stromverlauf bei beladener Shuttlefahrt, Quelle: Eigene Darstellung basierend auf KNAPP AG Messungen.	61
Abbildung 36: Stromaufnahmen und Geschwindigkeitsverläufe bei unterschiedlichen Getriebeübersetzungen, Quelle: Eigene Darstellung basierend auf KNAPP AG Messungen.	62
Abbildung 37: Konfigurationsprofil für den Testaufbau, Quelle: KNAPP AG OSR Shuttle™ Software.	63
Abbildung 38: Stromaufnahme während Load-Store-Phasen, Quelle: Eigene Darstellung basierend auf KNAPP AG Messungen.	63
Abbildung 39: Stromaufnahme bei Bewegungen des beladenen OSR Shuttle™, Quelle: Eigene Darstellung basierend auf KNAPP AG Messungen.	65

Abbildung 40: Stromaufnahme bei Bewegungen des nicht beladenen OSR Shuttle™, Quelle: Eigene Darstellung basierend auf KNAPP AG Messungen.	65
Abbildung 41: Messaufbau zur Ermittlung des Entladeverhaltens des Doppelschichtkondensator-Packs, Quelle: Eigene Aufnahme.....	68
Abbildung 42: Messergebnis des Entladeverhaltens des Doppelschichtkondensator-Packs bei konstanter Last, Quelle: Eigene Darstellung.	68
Abbildung 43: Nennkapazität des Akkumulators in Abhängigkeit der Zyklenzahl, Quelle: Datenblatt von AccuPower (Hrsg.).	72
Abbildung 44: Tabelle 7 aus EN ISO 13849-1 zur Bewertung des erreichbaren Performance Levels, Quelle: EN ISO 13849-1.....	77
Abbildung 45: Elektrische Daten der EC310 Motorrolle, Quelle: Datenblatt von Interroll (Hrsg.).....	79
Abbildung 46: Symbolbild Slave-Rollen mit PolyVee Riemen, Quelle: Interroll (2017), Onlinequelle [08.11.2017].....	81
Abbildung 47: Übersetzung und Geschwindigkeit der EC310 Motorrolle, Quelle: Datenblatt von Interroll.	82
Abbildung 48: Leerlaufstrom der EC310, Quelle: Eigene Darstellung basierend auf KNAPP AG Messungen.	82
Abbildung 49: Stromaufnahme der EC310 während der Beschleunigung, Quelle: Eigene Darstellung basierend auf KNAPP AG Messungen.....	83
Abbildung 50: Stromaufnahme der EC310 während des Bremsens, Quelle: Eigene Darstellung basierend auf KNAPP AG Messungen.....	84
Abbildung 51: Angenäherter Stromverlauf von 2 Plattformen, Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an KNAPP AG Messungen.....	85
Abbildung 52: Symbolbild eines RCOAX Systems für industrielle WLAN Anwendungen mit Leckwellenleiter, Quelle: Siemens (2017), Onlinequelle [09.11.2017] (leicht modifiziert).	89

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Auszug der elektrochemischen Spannungsreihe, Quelle: Schulz (2014), S. 12.....	13
Tabelle 2: Typische Kennwerte bei Laden eines Bleiakкумуляtors, Quelle: Jossen/Weydanz (2006), S. 201.....	27
Tabelle 3: Kennwerte eines Bleiakкумуляtors, Quelle: Reddy (Hrsg.) (2014), S. 1.13.	29
Tabelle 4: Zyklenzahl eines 143 Ah Valve-Regulated-Lead-Acid (VRLA) Bleiakкумуляtors in Abhängigkeit der Belastung, Quelle: Kurzweil/Dietlmeier (2015), S. 264.....	31
Tabelle 5: Kennwerte des Lithiumion-Kobalt-Akkumulators, Quelle: Schulz (2014), S. 80.	37
Tabelle 6: Kennwerte des Lithiumion-Mangan-Akkumulators, Quelle: Schulz (2014), S. 81.	37
Tabelle 7: Kennwerte des Lithium-Eisenphosphat-Akkumulators, Quelle: Schulz (2014), S. 82.	38
Tabelle 8: Kennwerte des Lithiumion-Titanat-Akkumulators, Quelle: Schulz (2014), S. 84.	39
Tabelle 9: Kennwerte einer Super Charge Ion Battery, Quelle: Schulz (2014), S. 85.	39
Tabelle 10: Kennwerte des Lithium-Sulfat-Akkumulators, Quelle: Schulz (2014), S. 86.	40
Tabelle 11: Kennwerte des Lithium-Schwefel-Akkumulators, Quelle: Schulz (2014), S. 87.....	40
Tabelle 12: Kennwerte des Lithium-Luft-Akkumulators, Quelle: Schulz (2014), S. 87.	41
Tabelle 13: Kennwerte des Lithium-Polymer-Akkumulators, Quelle: Schulz (2014), S. 91 (erweitert).....	42
Tabelle 14: Übersicht der Kennwerte von Lithiumsystemen, Quelle: Eigene Darstellung basierend auf Tabellen 5 bis 13.	42
Tabelle 15: Vergleich von Doppelschichtkondensator, Batterie, Kondensator, Quelle: Kurzweil/Dietlmeier (2014), S. 28 (leicht modifiziert).	48
Tabelle 16: Nutzwertanalyse für Technologiebewertung, Quelle: Eigene Darstellung.	58
Tabelle 17: Technische Daten des LSUC 003R0S 0380F EA, Quelle: Eigene Darstellung basierend auf Angaben aus Datenblatt von LS Ultracapacitor (Hrsg.).	67
Tabelle 18: Übersicht Dauer eines Doppelspiels in Abhängigkeit der Strecken, Quelle: Eigene Darstellung.	70
Tabelle 19: Technische Daten des AP2510-GG, Quelle: Eigene Darstellung basierend auf Angaben aus Datenblatt von AccuPower (Hrsg.).	72
Tabelle 20: Übersicht Dauer eines Doppelspiels in Abhängigkeit der Strecken, Quelle: Eigene Darstellung.	75