

**Gefördert durch:**



**Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie**

**aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages**

Schlussbericht des Fördervorhabens:

**Entwicklung einer Fertigungsmethodik für neuartige  
Hochenergiebatteriezellen zur Erprobung der Technologie  
für eine spätere Großserienfertigung in Deutschland  
(Li-FeM)**

**Förderkennzeichen: 0327889 A**

**Laufzeit des Vorhabens:**

01.04.2010 bis 31.05.2014

**Zuwendungsempfänger:**

VOLKSWAGEN VARTA Microbattery Forschungsgesellschaft mbH  
& Co KG

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim  
Autor.

## **Forschungsprojekt:**

Entwicklung einer Fertigungsmethodik für neuartige Hochenergiebatteriezellen zur Erprobung der Technologie für eine spätere Großserienfertigung in Deutschland  
**(Li-FeM)**

## **Projektpartner:**

VOLKSWAGEN VARTA Microbattery  
Forschungsgesellschaft mbH & Co KG



## **Autoren des Schlussberichts**

Dr. Konrad Holl

Prof. Dr. Werner Schreiber

Dr. Markus Pompetzki

Dr. Sebastian Schebesta

Dr. Andreas Huth

## **Kurzfassung**

Die Technisch-Organisatorischen Vorbereitungen umfassten u.a. die Erstellung eines Lastenheftes für die einzelnen Prozessschritte der Fertigungsmethodik für automobiler 30-40 Ah-Hochenergie-Batteriezellen mit packagekonformer Geometrie. Es erfolgte die weitere Detaillierung der Anlagenkonzepte mit den Anlagenlieferanten. Im Rahmen des Projektes wurde ein Businessplan zur Abschätzung der Zellkosten und der für eine spätere Serienfertigung erforderlichen Investitionen erstellt. Zunächst war die Erweiterung des Prozesses auf die Darstellung von 60 Ah-Batteriezellen geplant. Erste Muster solcher Zellen zeigten jedoch, dass die geforderte Sicherheit (HZ-Level>4) nicht erreicht werden konnte. Nach Genehmigung durch den Fördergeber wurden dann die Ziele auf maximal 40 Ah begrenzt und alle weiteren Forschungsarbeiten darauf ausgerichtet. Anschließend wurden die Anforderungen von den vorhandenen Anlagen auf Serienfertigungsanlagen übertragen. Damit entstand ein Konzept für eine Massenfertigung. Hierbei wurden besonders die limitierenden Faktoren bei der Skalierung betrachtet. Im Rahmen der freiwilligen Verlängerungsphase von 2 Monaten wurden die Einflüsse der dünneren Kollektorfolien auf die Prozessschritte der Fertigungsmethodik und die Auswirkungen der Änderungen der Polbolzen bearbeitet.

## **1 Beitrag des Ergebnisses zu den förderpolitischen Zielen, z.B. des Förderprogramms (ggf. unter Angabe des Schwerpunkts), -soweit dies möglich ist-**

Der Nationale Entwicklungsplan Elektromobilität (NEP) beschreibt, dass die Technologien für elektrische Antriebe, Energiespeicher und Netzinfrastruktur in ihren Grundlagen entwickelt sind. Allerdings besteht an zahlreichen Stellen der Wertschöpfungskette noch Forschungs- und Optimierungsbedarf. Vor allem in der Schlüsseltechnologie der Batteriespeicher sind erhöhte Anstrengungen erforderlich, um die globale Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Automobilindustrie zu behaupten und zu stärken. Wie auch im Koalitionsvertrag der Bundesregierung festgelegt, soll dabei ein entscheidender Beitrag auf der Förderung innovativer Batterietechnologien liegen. Bereits im Jahr 2008 wurde im BMWi-Förderkonzept *Stromspeicher* klar die Etablierung von Kapazitäten zur Umsetzung der Wertschöpfungskette bei der Herstellung von Stromspeichern genannt. Auch in der Potenzial-Analyse des NEP wird explizit auf die aktuellen „Schwächen“ in Deutschland hingewiesen, insbesondere auf die in Deutschland kaum etablierte Produktion von Zellen und Batteriesystemen sowie die hohen Batteriekosten.

Der Einstieg in die Elektromobilität ist kurzfristig über Demonstrationsvorhaben und Feldversuche möglich. Erste Plug-In-Hybridfahrzeuge (PHEV) und reine Elektrofahrzeuge (EV) können in wenigen Jahren Marktreife erlangen. Es ist festzustellen, dass die auf dem Markt angebotenen Fahrzeugen verwandten Batterien in Bezug auf Lebensdauer, Preis, Gewicht und Sicherheit nicht den Kundenansprüchen entsprechen und die so ausgestatteten Fahrzeuge somit nicht für den Aufbau eines Massenmarktes geeignet sind. Grundsätzlich muss festgestellt werden, dass Elektrofahrzeuge sich letztlich nur dann durchsetzen werden, wenn die Entwicklung ihrer Gesamtkosten die Gewähr dafür bietet, dass sich Elektrofahrzeug beim Kunden durchsetzen werden.

Die Entwicklung neuartiger, kostengünstiger, leistungsfähiger und zugleich zuverlässiger Energiespeicher ist realistisch, aber hochgradig ambitioniert. Der Plan zeigt auch deutlich die zentrale Aufgabe, auf dem Weg zu Hochenergie- und Hochleistungsbatterien der 2. bis 4. Generation, neuartige Elektroden, Elektrolyte und Separatoren zu erforschen. Dabei besteht durch die hohe Anzahl möglicher Materialkombinationen noch ein erheblicher Forschungs- und Entwicklungsbedarf.

Neben der Batterietechnologie beschreibt der Nationale Entwicklungsplan Elektromobilität auch die Bedeutung der Entwicklung einer präzisen und ausgereiften Prozesstechnik zur Erreichung seiner Ziele. Diese Fertigungstechnik ist erforderlich, um die geforderten Qualitätsansprüche an moderne Hochleistungsbatterien erfüllen zu können.

Das erfolgreich durchgeführte Forschungsprojekt Li-FeM unterstützt diese Anstrengungen in einer sehr geeigneten Weise. In diesem Förderprojekt wurden die chemischen Systeme der Batteriezellen der zukünftigen Generation (3. / 4. Generation) erforscht. Die Ergebnisse bilden eine Grundlage, auf der in Folge die anschließende Massenproduktion erfolgreich stattfinden kann.

Die Ergebnisse des laufenden Forschungsvorhabens ließen es sinnvoll erscheinen, das Forschungsprojekt um 2 Monate zu verlängern. In dieser Zeit wurden weitere Erkenntnisse zum Thema Verarbeitung dünnere Kollektorfolien, dickere Beschichtungen und Flachpole zu erarbeiten. Diese Verlängerung wurde auch entsprechend genehmigt.

## **2 Wissenschaftlich-technisches Ergebnis des Vorhabens, die erreichten Nebenergebnisse und die gesammelten wesentlichen Erfahrungen**

In den einzelnen Ganttcharts sind einzelne Punkte rot markiert. Hierbei handelt es sich um die Änderungen gegenüber dem ursprünglichen Projektplan.

Die wissenschaftlich-technischen Ergebnisse, erreichte Nebenergebnisse und wesentliche Erfahrungen werden in den nachfolgenden Kapiteln dargestellt.

### **2.1 AP 1 – Technisch-organisatorische Vorbereitungen**

Dauer: 01.04.2010 bis 30.09.2010

Das Arbeitspaket 1 gliedert sich gemäß Tabelle 1 in Unterarbeitspakete.

Schlussbericht Zuwendungsempfänger  
Förderkennzeichen: 0327889 A

AP-Nr.	Arbeitspakete (AP)	2010								2011								2012								2013								2014						
		II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	I	II																
	Projektmonat	1	2	3	4	5	6	7	8	9	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#
1	<b>Technisch-organisatorische Vorbereitungen</b>																																							
1.1	Erstellung des Lastenheftes für die Erforschung der Fertigungsmethodik																																							
1.2	Räumliche Verlagerung der vorhandenen Anlagen nach vorliegendem Plan																																							
1.3	Orientierende Versuche zur Fertigungsmethodik																																							
1.4	Schulung des Personals (Sicherheit, Umgang mit großformatigen Zellen)																																							
MS1	- Lastenheft für Fertigungsmethodik ist erstellt																																							

Tabelle 1: Gantt-Diagramm zu den Arbeiten im Rahmen des Arbeitspaketes 1

Wie im Zwischenbericht für den Berichtszeitraum 01.07.2010 – 31.12.2010 beschrieben, konnten alle im Projektantrag geplanten Arbeiten zu den Arbeitspaketen AP 1.1 – 1.4 erfolgreich und fristgerecht abgeschlossen werden. Der Meilenstein 1 (MS 1) wurde daher planmäßig erreicht.

**2.1.1 AP 1.1 - Erstellung des Lastenheftes für die Erforschung der Fertigungsmethodik**

Dauer: 01.04.2010 bis 30.09.2010

Die Arbeiten zu diesem Arbeitspaket wurden erfolgreich und fristgerecht abgeschlossen. Das Lastenheft für die Erforschung der Fertigungsmethodik nach AP 1.1 liegt vor. Es beschreibt die Prozesskette, das technische Umfeld sowie deren Verknüpfung. Die Erstellung von Lastenheften basiert auf den Prozessschritten, die in Abbildung 1 dargestellt sind. Die Herausforderungen liegen dabei in den Randbedingungen, die bei der Fertigung automobiltauglicher Li-Ionen-Zellen mit einer Lebensdauer > 10 Jahre berücksichtigt werden müssen. Dies sind insbesondere:

- die Handhabung von nanoskaligem Material
- der Umgang mit Wassergehalten im ppm-Bereich
- die Erzielung von Beschichtungstoleranzen im 1µm-Bereich
- die Herstellung von Zellwickel mit neuartiger Laserschnitttechnologie
- die Elektrolytbefüllung in einer neuartigen Kombination von Vakuum und Druck
- die hermetische Verschlussstechnik mittels Schweißverfahren
- die Erforschung einer Methode für die Formation großer Batteriezellen
- den Aufbau eines elektrischen Prüffelds mit Berücksichtigung, dass es sich bei den Zellen um Gefahrgut handelt.

Die bisherigen orientierenden Versuche zur Fertigungsmethodik in AP 1.3 hatten gezeigt, dass die Prozessschritte Verdichten und Schneiden der Elektroden unter Trockenraumbedingungen stattfinden müssen. Ursache ist die hohe Wasseraufnahme der Nanomaterialien durch die hohe Oberflächenaktivität. Dies gilt insbesondere für Lithiumeisenphosphat.



Abbildung 1: Prozesskette zur Herstellung automobiltauglicher Li-Ionen-Batteriezellen

Die wesentlichen Punkte des Lastenheftes für die Erforschung der Fertigungsmethode sind nachfolgend kurz beschrieben:

- Die einzelnen Prozessschritte müssen so ausgelegt sein, dass höchste Formatflexibilität, z.B. runde als auch prismatische Zellen bis 60 Ah hergestellt werden können.
- Die Prozesse müssen für eine spätere Großserienfertigung skalierbar sein.
- Das Kostenziel muss auf Basis der erforschten Fertigungsmethodik und Materialien innerhalb enger Fehlergrenzen berechenbar sein.
- Wegen Kosten und Präzision sollen die Elektroden gewickelt werden.
- Die Elektrodenbeschichtung muss kontinuierlich und diskontinuierlich möglich sein. Es sollen sowohl lösemittel- als auch wasserbasierte Rezepturen verarbeitbar sein.
- Der Kalandrierer muss auch diskontinuierlich beschichtete Elektrodenbänder pressen können.
- Die Wickel sollen in unterschiedlichster Ableiter-Konfiguration herstellbar sein um das innere Zellvolumen so optimal wie möglich auszunutzen zu können. Hierfür soll die bei VARTA Microbattery entwickelte Laserschnitttechnologie weiter entwickelt werden, um hochkomplexe Ableitergeometrien und -anordnungen vollautomatisch schneiden und wickeln zu können.
- Das Gehäuse soll aus Aluminium oder Edelstahl sein. Aluminium wird wegen des geringeren Gewichts, niedriger Kosten und besseren Wärmeleitfähigkeit favorisiert. Die Technologie mit Foliengehäuse („Pouch“-Gehäuse) wird im Projekt nicht verfolgt.
- Es müssen nanoskalige Materialien verarbeitbar sein. Dies erfordert besondere Anlagen und eine Infrastruktur, die den Schutz der Mitarbeiter absichert. Berufsgenossenschaften, Gewerbeaufsichtsämter und TÜV müssen frühzeitig in die Projekte eingebunden werden.
- Die Elektrolytbefüllung muss unter Vakuum und Druck möglich sein.
- Die technischen Untersuchungen im Rahmen des Projekts haben gezeigt, dass neue Materialien wie Lithiumeisenphosphat ( $\text{LiFePO}_4$ ) sehr hygroskopisch und schwierig zu trocknen sind. Im Vergleich zum  $\text{LiCoO}_2$ -Kathodenmaterial ist es deshalb erforderlich, mehr Prozesse unter trockener Atmosphäre durchzuführen. Für das Schneiden und Kalandrieren wurden deshalb Mittel umgewidmet um einen zusätzlichen Trockenraum aufzubauen. Die Umwidmung wurde beantragt und vom PTJ genehmigt.
- Da von geladenen Zellen eine Gefährdung durch Feuer oder im schlimmsten Fall sogar explosionsartige Zersetzung ausgehen kann, sind umfangreiche Konzepte mit den Sicherheitsexperten Vorort, dem TÜV und der Werksfeuer auszuarbeiten. Die davon abgeleiteten Vorgaben müssen in den Konstruktionen der Anlagentechnik berücksichtigt werden. Dies betrifft vor allem Prozessschritte wie Formation, Tempern und Prüfen.
- Soweit gesetzlich vorgeschrieben müssen die Anlagen CE-konform sein.

- Die Erfüllung gesetzlicher Sicherheits- und Umweltauflagen sind nachzuweisen.
- Die Mitarbeiter sind in Bezug auf mögliche Gefährdungen im Umgang mit Strahlen wie z. B. Beta-Strahlung am Schichtdickenmessgerät und Laserstrahlen am Schweißlaser zu schulen.

### 2.1.2 AP 1.2 - Räumliche Verlagerung der vorhandenen Anlagen nach vorliegendem Plan

Dauer: 01.04.2010 bis 30.09.2010

Von der VARTA Microbattery GmbH wurde ein Teil der Anlagen zur Nutzung und zum Umbau übernommen. Ein Teil dieser Maschinen befand sich bei Projektstart teilweise noch in anderen Bereichen der VARTA Microbattery GmbH. Ein weiterer Teil der Maschinen, die bereits in den richtigen Räumlichkeiten standen, wiesen eine unpassende Anordnung auf. Diese Maschinen mussten an ihre korrekten Positionen, dem nachfolgend abgebildeten Raumplan (siehe Abbildung 2) gemäß, transferiert werden.

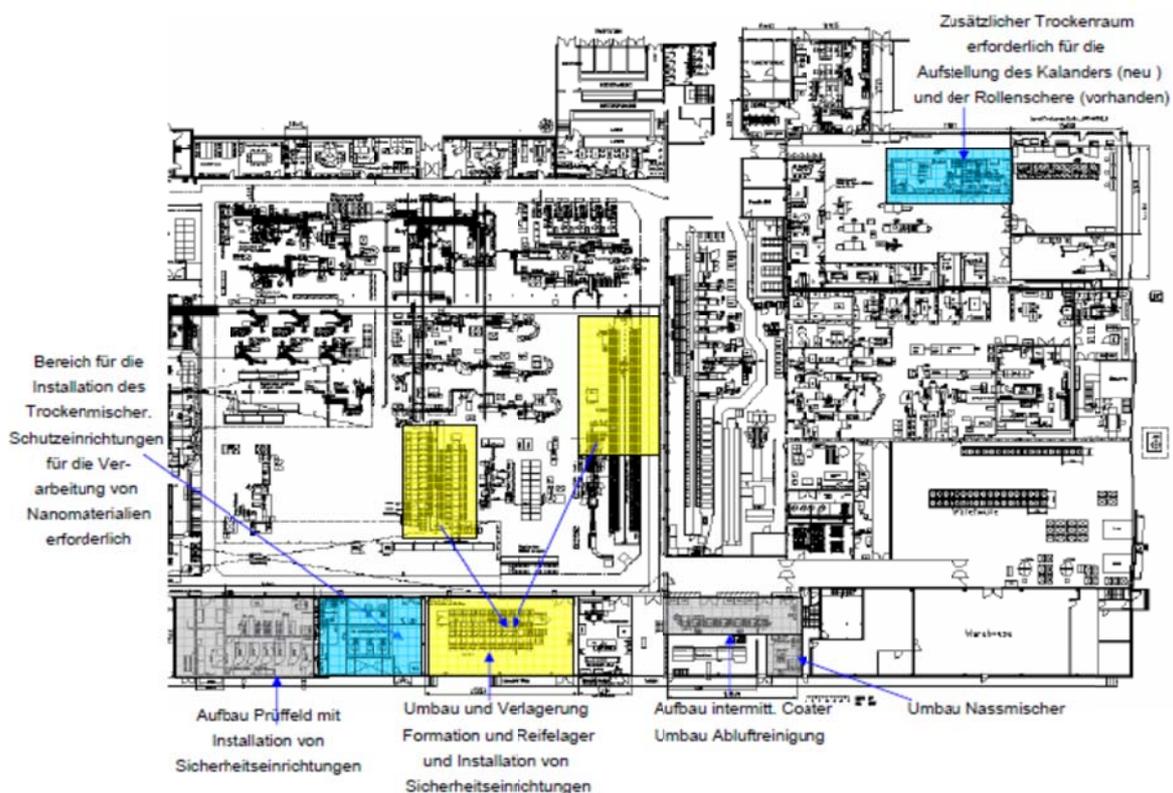


Abbildung 2: Layout-Planung für die Arbeitsbereiche der VOLKSWAGEN VARTA Microbattery Forschungsgesellschaft mbH & Co KG

Das Ziel des Arbeitspaketes war die Verlagerung der Anlagen im vorgegebenen Zeitraum abzuschließen. Der Umfang der Tätigkeiten umfasste ausschließlich den Umbau und die Neuaufstellung des Hochregallagers für die Formation und das Reifelager.

Die Bautätigkeiten wurden folgendermaßen ausgeführt: Aufbauend auf der planmäßigen Installation des Fundamentes wurden die Fundamentschienen verlegt, mit dem Boden verschraubt und mit Beton vergossen. Nachfolgend wurde das vorhandene Regalsystem in Regaltürme zerlegt und diese komplett abgebaut. Die Regaltürme wurden liegend transportiert und im neuen Raum nach Plan neu kombiniert und ausgerichtet. Danach wurden die einzelnen Türme des Hochregals wieder miteinander verschraubt. Die Aussteifung des Gesamtaufbaus wurde über Wandanker und Querstreben untereinander erreicht. Im ersten Arbeitsschritt wurde der Aufbau des Reifelagers vorgenommen und im zweiten Schritt das Formationshochregal aufgebaut. Nachdem der Aufbau des Regalsystems abgeschlossen wurde, konnten mit der Installation des Regalbediengerätes begonnen werden. Abschließend konnte die Software für das Bediengerät aufgespielt und getestet werden. Der

Kistentransport und die Einlagerung wurden erfolgreich nachgewiesen. Der Umzug der Anlage konnte damit abgeschlossen werden.

Der Umbau der Formation und des Reifelagers erfolgte, wie in Abbildung 3 dargestellt. Als Ergebnis dieses Arbeitspakets liegt ein vollständig funktionsfähiges Regallagersystem vor, das als Reifelager und als Formationsregal für eine Vielzahl von Forschungsversuchszellen genutzt wurde.



Abbildung 3: Regalaufbau für Formation und Reifelager am neuen Standort.

### **2.1.3 AP 1.3 - Orientierende Versuche zur Fertigungsmethodik**

Dauer: 01.04.2010 bis 30.09.2010

Die orientierenden Versuche, die im Rahmen dieses Unterarbeitspaketes durchgeführt wurden, dienen der Validierung der Parameter, die im Lastenheft der Fertigungsmethodik festgelegt wurden. Das Arbeitspaket umfasst die Versuche zu folgenden Themenbereichen:

- Orientierende Versuche zur Schrumpfung der Separatoren bei Temperaturbehandlung
- Orientierende Versuche zum Trockenmischverfahren
- Orientierende Versuche zum Nassmischverfahren
- Orientierende Versuche zur Beschichtung
- Orientierende Versuche zur Kontaktierung der Ableiterbündel

#### **Orientierende Versuche zur Schrumpfung der Separatoren bei Temperaturbehandlung**

Die mechanische Stabilität der Separatoren unter Temperatureinfluss ist aus mehreren Gründen von Interesse. Der Separator muss unter anderem eine Trennung der beiden Elektroden bei Temperaturen oberhalb der normalen Betriebstemperatur weiterhin sicherstellen. Solche können bei einem internen Kurzschluss, bei überhöhten Außentemperaturen oder bei Überladung auftreten.

In Vorversuchen wurde das Schrumpfungsverhalten von verschiedenen Separatormaterialien bei einer Temperaturbehandlung von 120 °C untersucht. Diese Temperatur wurde gewählt, um eine Schädigung der Elektroden während der Trocknung auszuschließen. Diese Schrumpfungstests geben jedoch nur einen ersten Hinweis auf das Verhalten in den Zellen, da der Separator im Zellwickel zusätzlich durch Zugspannung fixiert ist.

Die Proben wurden mit Kaptonband auf Papier fixiert, so dass sie sich frei zusammenziehen können. Die Dimensionen in Maschinenrichtung (MD) und transversaler Richtung (TD) sowie die Luftdurchlässigkeit nach Gurley wurden vor und nach der Temperaturbehandlung vermessen (Tabelle 2).

Material	Schrumpfung		Gurley-Zahl <sup>a)</sup>	
	MD	TD	vor Behandlung	nach Behandlung
PP/PE/PP-Separator Referenz (16 µm)	13,3 %	-0,6 %	320,6	432,0
PP-Separator Lieferant B, großporig (25 µm)	9,7 %	-0,8 %	243,7	240,6
PP/PE/PP-Separator Lieferant F (20 µm)	9,5 %	11,0 %	546,3	1.682,5
PP-Separator Lieferant B, kleinporig (20 µm)	7,9 %	-0,5 %	267,0	303,9
PP-Separator Lieferant B, großporig (20 µm)	4,0 %	-0,3 %	214,1	225,0
hochschmelzender Separator Lieferant G (25 µm)	3,3 %	0,8 %	251,5	273,5
hochschmelzender Separator Lieferant G (20 µm)	2,5 %	0,8 %	373,6	409,2
hochschmelzender Separator Lieferant E (25 µm)	2,2 %	2,9 %	27,8	20,5
PP-Separator Lieferant F (20 µm)	2,1 %	6,7 %	197,8	290,7
hochschmelzender Separator Lieferant E, verstärkt (25 µm)	1,8 %	0,8 %	65,0	61,3

<sup>a)</sup> Zeit in s, um 100 cm<sup>3</sup> Luft bei einem definierten Druck durch eine Probenfläche von 6,45 cm<sup>2</sup> zu drücken

Tabelle 2: Ergebnisse Schrumpfungsversuche bei 120 °C/1 h

Abschließend konnte die Aussage getroffen werden, dass unter den untersuchten Separatoren Kandidaten sind, die eine Erhöhung der Trocknungstemperatur für die Zellwickel erlauben würden.

#### **Orientierende Versuche zum Trockenmischverfahren**

Das Verfahren, Partikel mit Partikeln kleinerer Größe im Trockenzustand zu beschichten, ist aus unterschiedlichen Bereichen der Industrie bekannt. Das sogenannte Coatieren wird im Bereich der Herstellung von Holz-Kunststoff-Verbundstoffen oder bei der Herstellung von Metallic-Partikeln der Lackindustrie angewandt. Im Bereich der Batterieherstellung ist das Coatieren ein denkbarer Veredlungsschritt für Aktivmaterialien der Kathoden und Anoden.

Es wurden Versuchsreihen mit Kathodenmaterialien durchgeführt, bei denen die Reihenfolge der Zugabe, die Bestandteile und die Behandlung der Bestandteile variiert wurde. Die Mischdauer und der Füllgrad des Mixers wurden konstant gehalten. Als Zielgrößen wurden elektrochemische und optische Messgrößen zur Bewertung herangezogen. Es wurden ebenfalls Versuchsreihen mit Anodenmaterialien durchgeführt. Dabei wurden Mischertyp, Material, Mischzeit und Werkzeugaufbau variiert.

Das Kathodenmaterial wird durch den Trockenmischschritt geschädigt. Die Vorbehandlung mit dem Trockenmischer führte zu keiner Verbesserung der elektrischen Eigenschaften, sondern zu deren Verschlechterung. Die Degradation der Entladekapazität ist so gravierend, dass es schon nach wenigen Lade- und Entladezyklen zu einem vollständigen Verlust der Kapazität kommt, wie in

Abbildung 4 zu sehen ist. Dieses eindeutige Ergebnis verbietet es, das Kathodenmaterial in einem Trockenmischschritt zu strapazieren.

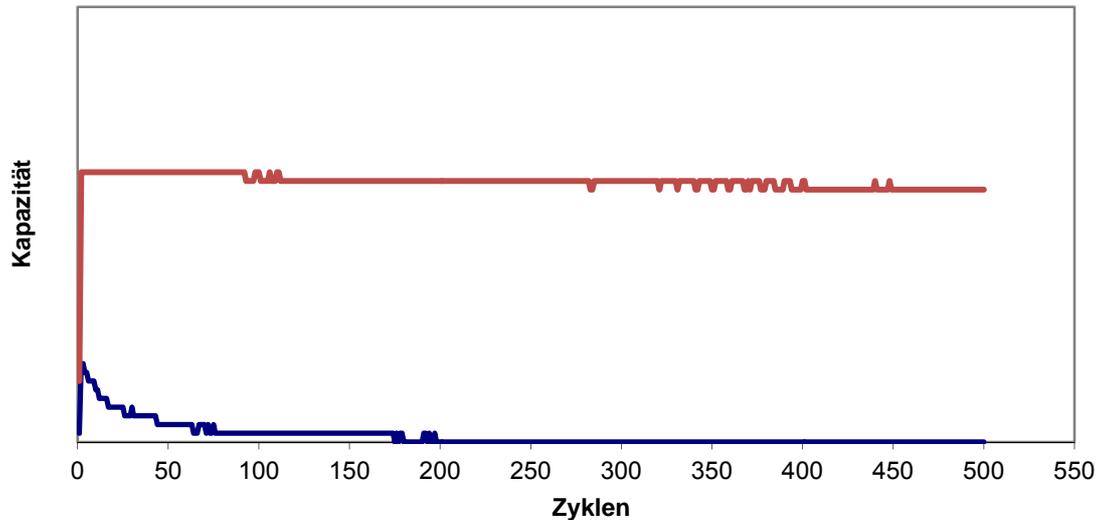


Abbildung 4: Zyklisierungsverhalten einer Kathode bei 20 °C hergestellt aus Pulver ohne (oben, 053562.2c.0103) und mit (unten, 053562.2c.102) Vorbehandlung im Trockenmischer.

Die Bearbeitung der Ausgangsstoffe für die Herstellung von Anoden hat gezeigt, dass der Trockenmischer das Ausgangspulver deutlich besser aufbereitet. Das Anodenmaterial wird in Pulverform besser homogenisiert, denn Agglomerate aus Silizium werden vollständig aufgelöst. Aus diesem trocken vorgemischten Pulver wurde anschließend die Paste in einem Nassmischschritt hergestellt. Das Mischergebnis nach dem Nassmischschritt wird aber nicht von einer vorherigen Trockenmischung im untersuchten Parameterfenster signifikant beeinflusst. Das Ergebnis, das sich in Abbildung 5 darstellt, ist auch ohne die vorherige Homogenisierung des Trockengemisches erzielbar. Damit ist das Trockenmischen ein Prozessschritt, der nicht zu einer Verbesserung der finalen Elektrode führt. Als zweites wesentliches Ergebnis zeigte sich, dass mit keinem Mischer eine Beschichtung des Grafites mit den Silizium-Partikeln möglich ist. Es stellte sich bei allen Versuchen heraus, dass sich die Graphitplättchen nicht in dem Ausmaß mit Silizium beschichten ließen, wie es für Herstellung eines Komposites nötig ist. Das Trockenmischen ist somit ein Prozessschritt von fragwürdigem Nutzen für das Kathoden- und Anodenmaterial. Die Beschaffung eines Trockenmischers wurde nach dieser Datenlage ausgesetzt.



Abbildung 5: REM-Aufnahme einer fertigen Si/C-Komposit Anode in 20.000-facher Vergrößerung. Sichtbar sind Silizium- und Rußpartikel auf mehreren Graphitplättchen.

#### Orientierende Versuche zum Nassmischverfahren

Die Mischtechnik im Nassbereich ist neben der Beschichtung der zentrale qualitätsbestimmende Prozessschritt. Im Bereich der Nassmischtechnik sind unterschiedliche Mischprinzipien bekannt, aus denen die zielführenden ausgewählt werden mussten. Bei VOLKSWAGEN VARTA Microbattery

Forschungsgesellschaft (VW-VM) sind Mischwerkzeug in Form von Dissolvern und Hochgeschwindigkeits-Rotor-Stator-Mischern sowie Propellermischern vorhanden. Die Mischversuche haben gezeigt, dass die Mischtechnik auf Basis von Dissolvern nicht zu einem guten Mischergebnis bei den eingesetzten Materialien führte. Besonders bei Lithium-Eisenphosphat ( $\text{LiFePO}_4$ ) traten Agglomerate auf, die zu qualitativ minderwertigen Beschichtungen führten, wie Abbildung 6 beispielhaft zeigt. Infolge dessen musste ein zusätzlicher Bearbeitungsschritt der Paste mit dem Hochgeschwindigkeits-Rotor-Stator-Mischer eingefügt werden. Mit dieser massiven Einbringung von Energie durch den obigen Intensivmischer konnten die besagten Agglomerate aufgerieben werden. Nachteilig waren aber bei diesem hochenergetischen Bearbeitungsschritt die starke Beanspruchung der Beschichtung der Aktivmaterialpartikel und die lokale Überhitzung der Paste. Demnach mussten weitere Versuche mit verändertem Mischprinzip durchgeführt werden.

Das finale Mischprinzip, mit dem die besten Ergebnisse erzielt werden konnten, war der dreiarmlige Vertikalknetter. Die Pasten konnten intensiv aber schonend verarbeitet werden.



Abbildung 6: Streifenbildung im Beschichtungsbild aufgrund von Agglomeraten in der Anodenpaste

### **Orientierende Versuche zur Beschichtung**

Neben dem Betrieb des Laborbeschichters wurde der vorhandene Beschichter zur Absicherung der Ergebnisse benötigt. Da es sich bei dem neu zu beschaffenden Beschichter um eine Neuentwicklung handelte, die intermittierendes Beschichten mit einem neuen Massezuführungssystem bewältigen musste, traten Anlaufprobleme auf. In diesem Fall konnten die Arbeiten mit dem bereits vorhandenen Beschichter abgesichert und weitergeführt werden. Das bedeutet, dass der vorhandene Beschichter während der gesamten Projektlaufzeit von VARTA Microbattery GmbH gemietet werden musste.

Zum Erreichen der hohen Anforderungen an Zyklenstabilität und Energiedichte ist die Einhaltung der Lithiumbilanzierung zwischen Anode und Kathode von zentraler Bedeutung. Die Abweichungen der Beschichtungsdicke müssen daher in engen Grenzen quer und längs zur Beschichtungsrichtung gehalten werden. Eine enge Tolerierung der Beschichtung sichert an jeder Stelle in der Batterie die Lithiumbilanz und spart Aktivmaterial und daher Gesamtgewicht.

Bei VW-VM gibt es bestehende Beschichtungssysteme, die für wertvolle vorbereitende Versuche benutzt wurden. Über dies hinaus wurde das Technikum des Maschinenlieferanten genutzt, um die intermittierende Fahrweise einer Schlitzdüsenbeschichtung im Vorfeld der Maschineninbetriebnahme zu testen. Ziel der Beschichtungsversuche war es, die Parameter für die Reproduzierbarkeit einer qualitativ hochwertigen Direktbeschichtung in vollflächiger und intermittierender Fahrweise zu ermitteln und die einzustellende Bandbreite zu finden.

Die Versuchsreihen auf dem Laborbeschichter dienten zur reproduzierbaren Einhaltung der bestmöglichen Toleranzen der Quer- und Längsverteilung bei vollflächiger Beschichtung. Die Versuche beim Maschinenlieferanten dienten der gegenseitigen Absicherung der Maschinenabnahme. Die Versuche sind zur Optimierung der intermittierenden Beschichtung notwendig gewesen, da dabei die Präzision und die Limitierung schon vor Inbetriebnahme der Maschine in Ellwangen bekannt gemacht werden konnte.

Durch den Umbau des Laborbeschichters vom Kastenrakelsystem zum Kommarakelsystem, wie in Abbildung 7 dokumentiert, konnte die enorme Steigerung der Präzision gezeigt werden. Mit der finalen

Version des Beschichtungssystems können Beschichtungstoleranzen im einstelligen Prozentbereich reproduziert werden. Wohingegen das alte Beschichtungssystem Flächengewichtsabweichungen im zweistellige Prozentbereich aufzeigte. Durch die Umsetzung der Modifikationen am Beschichter konnten wertvolle Erfahrungen zum Aufbau und Betrieb präziser Beschichtungssysteme gewonnen werden.



Abbildung 7: Beschichtungswerk in der Ausbauf orm eines Kommarakelsystems

Die Beschichtungsversuche zur Intermittierung brachten das maximal erreichbare Flächengewicht bei optimaler Kantenqualität, wie Abbildung 8 zeigt, hervor. Ebenfalls konnten so schon im Vorfeld die Parameter einer reproduzierbaren Schlitzdüsenbeschichtung identifiziert werden. Die Kenntnis des Einflusses der Beschichtungsparameter, wie Förderdruck, Bahngeschwindigkeit, Trocknungs-temperaturprofil, Bahnspannung u.a. erleichterten die Inbetriebnahme und Abnahme der neuen Beschichtungsanlage in Ellwangen.

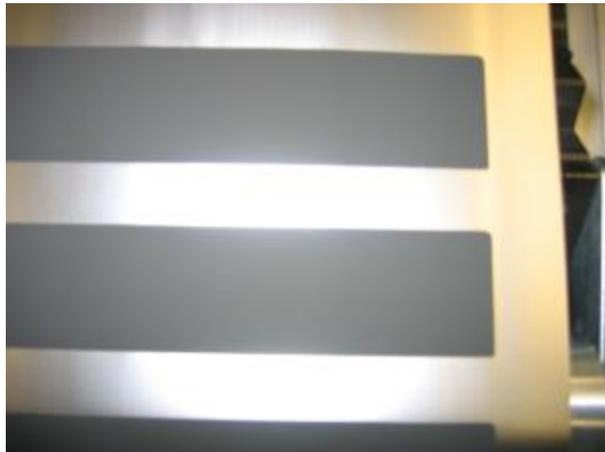


Abbildung 8: Beispiel einer optimalen intermittierenden Beschichtung

#### **Orientierende Versuche zur Kontaktierung der Ableiterbündel**

Intensive Versuche haben ergeben, dass die vorhandenen zwei Ultraschall-Schweißanlagen in der Leistung nicht ausreichend sind, um die Vielzahl der Aluminium- und Kupfer-Kollektorfolien an das Ableiterblech aus Aluminium oder Kupfer zu schweißen. Da für die Elektroden nur sehr dünne Kupferfolien mit ca. 10-15  $\mu\text{m}$  bzw. Aluminiumfolien mit ca. 15-20  $\mu\text{m}$  eingesetzt werden, müssen bis zu 100 Lagen sicher miteinander verschweißt (Bündeln) und gleichzeitig an ein 1-3 mm dickes Pol-Ableiterblech angeschweißt werden. Umfangreiche Vorversuche bei einem Hersteller für US-Schweißanlagen haben gezeigt, dass für das Kontaktieren eine Schweißanlage mit 6,5 kW gut geeignet ist. Die bei VWVM vorhandenen zwei Anlagen, haben nur eine Leistung von je 0,5 kW und werden weiterhin für kleinere Pouch-Laborzellen und 18650 Laborzellen eingesetzt. Die Abbildung 9 zeigt das Ergebnis von Schweißversuchen (Aluminium und Kupfer) bei dem 100 Folienlagen mit einem Alu- oder Cu-Blech mittels einer 6,5 kW Ultraschweiß-Anlage fest angebunden wurden.



Abbildung 9: Ergebnisse US-Schweißversuche an Aluminium- (links) und Kupfer-Ableiter-Bündeln (rechts).

Parallel dazu wurden detaillierte Versuche bei einem Schweiß-Laser-Hersteller durchgeführt. Die Ergebnisse der beiden intensiven Versuchsreihen wurden gegenübergestellt und verglichen. Die Entscheidung fiel zugunsten Laserschweißung aus, da sie in Bezug auf die Bauraumoptimierung und die Reduzierung der Schädigung der Elektroden die beste Alternative darstellte.

Abschließend kann der Nutzen des abgeschlossenen Arbeitspaketes 1.3 als außerordentlich groß herausgestellt werden, denn die Investitionsentscheidungen konnten abgesichert und Zeit beim Einfahren der Maschine gespart werden. Risiken der Arbeitssicherheit und die Umweltschutzes konnten minimiert werden.

#### **2.1.4 AP 1.4 - Schulung des Personals (Sicherheit, Umgang mit großformatigen Zellen)**

Dauer: 01.04.2010 bis 30.09.2010

Große Lithium-Ionen-Zellen bergen aufgrund des hohen Energieinhaltes (bis 240 Wh pro Zelle) spezielle Gefahrenpotenziale, auf die jeder Mitarbeiter explizit hingewiesen werden muss (Welche Gefahrstoffe können frei werden? Welcher Feuerlöscher ist zur Brandbekämpfung geeignet? etc.). Da die Sicherheit im Betrieb oberste Priorität hat, muss das gesamte Personal im Umgang mit den Chemikalien, den Maschinen und den Lithium-Ionen-Zellen intensiv geschult werden.

Obwohl schon zu Beginn der Forschung versucht wird, die Anzahl der verwendeten Gefahrstoffe und umweltgefährdende Stoffe zu minimieren, ist der Umgang mit Gefahrstoffen unvermeidlich. Der Umgang mit Gefahrstoffen wird durch eine allgemeine Schulung nicht abgedeckt und muss für jeden Gefahrstoff einzeln erfolgen. Einer dieser Stoffe ist NMP (N-Methylpyrrolidon). NMP ist ein Standardlösungsmittel in der Lithiumionentechnologie und konnte noch nicht vollständig durch andere Lösungsmittel ersetzt werden. NMP ist als giftig eingestuft. Laut Sicherheitsdatenblatt muss der Mitarbeiter vor Gebrauch besondere Anweisungen einholen. Für NMP wurde eine Arbeitsanweisung erstellt, die den Umgang (Schutzmaßnahmen, Kennzeichnung, Entsorgung, Lagerung) mit Mischungen, die diesen Stoff enthalten, regelt.

Die vom Gesetzgeber vorgeschriebenen Schulungen der Mitarbeiter im Umgang mit Maschinen und Chemikalien wurden durchgeführt. Zudem wurden bei VOLKSWAGEN VARTA Microbattery Forschungsgesellschaft mbH & Co KG ein Strahlenschutzbeauftragter und ein Laserschutzbeauftragter ausgebildet.

Da Nickel und Nickelverbindungen seit 01.12.2010 als giftig (krebserzeugender Stoff Kategorie 1) eingestuft sind und bei Kobaltverbindungen ebenfalls der Verdacht auf krebserzeugende Wirkung besteht, bestand aus arbeitsrechtlicher Sicht die Pflicht zur Schulung. Alle Mitarbeiter, die mit Kathodenmaterial in Berührung kommen können, wurden im Umgang mit nickel- und kobalthaltigen Materialien geschult. Parallel dazu wurde eine Arbeitsanweisung zum Umgang mit nickel- und kobalthaltigen Materialien erstellt und verteilt. Es wurde ein Schulungsplan erstellt. Die Schulungsnachweise wurden zentral archiviert.

## **2.2 AP 2 – Erforschung der Fertigungsmethodik für 30-40 Ah-Zellen (Generation 1), Aufbau und Einfahren der Versuchsanlagen**

Dauer: 01.04.2010 bis 30.09.2012

Das Arbeitspaket 2 gliedert sich gemäß

Tabelle 3 in Unterarbeitspakete. Wie in den Zwischenberichten für den Berichtszeitraum 01.04.2010 – 30.09.2012 beschrieben, konnten alle im Projektantrag geplanten Arbeiten zu den Arbeitspaketen AP 2.1 – 2.9 mit allen Unterarbeitspaketen erfolgreich und fristgerecht abgeschlossen werden. Der Meilensteine 2, 3, 4 und 5 (MS 2, 3, 4, 5) wurde daher planmäßig erreicht.

Schlussbericht Zuwendungsempfänger  
Förderkennzeichen: 0327889 A

AP-Nr.	Arbeitspakete (AP)	2010								2011								2012								2013								2014							
		I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV																
2	Erforschung der Fertigungsmethodik für 30-40Ah Zellen (Generation 1), Aufbau und Einfahren der Versuchsanlagen																																								
2.1	Erstellung Lastenhefte der Anlagentechnik auf Basis der Zelllastenhefte (von 30-40Ah-Zellen)																																								
2.1.1	Erstellung Lastenheft Trockenmischer																																								
2.1.2	Erstellung Lastenheft Maschinenteknik zur Herstellung von Si/C-Komposit																																								
2.1.3	Erstellung Lastenheft Nassmischer																																								
2.1.4	Erstellung Lastenheft Beschichtungsanlage Elektroden																																								
2.1.5	Erstellung Lastenheft Kalender																																								
2.1.6	Erstellung Lastenheft für Wickelautomat																																								
2.1.7	Erstellung Lastenheft Elektrolybefüllung																																								
2.1.8	Erstellung Lastenheft Formationsanlage																																								
2.1.9	Erstellung Lastenhefte Prüffeldanlagen																																								
2.1.10	Erstellung Lastenheft Trockenraumerweiterung																																								
2.2	Konzeption des Zellmusterbaus für 30-40 Ah-Zellen																																								
2.2.1	Konzeption des Zellmusterbaus für Rundzellen																																								
2.2.2	Konzeption des Musterbaus für prismatische Zellen																																								
MS2	- Lastenhefte für Versuchsanlagen sind erstellt - Zellmusterbau für 30-40Ah-Zellen ist konzipiert																																								
2.3	Identifikation geeigneter Lieferanten und ggf. Zweitlieferanten für Anlagentechnik und Komponenten																																								
2.4	Aufbau und Inbetriebnahme Versuchsanlagen																																								
2.4.1	Aufbau und Inbetriebnahme Trockenmischer																																								
2.4.2	Aufbau und Inbetriebnahme Maschinenteknik zur Herstellung von Si/C-Komposit																																								
2.4.3	Aufbau und Inbetriebnahme Nassmischer																																								
2.4.4	Aufbau und Inbetriebnahme Beschichtungs-Anlage Elektroden																																								
2.4.5	Aufbau und Inbetriebnahme Kalender																																								
2.4.6	Aufbau und Inbetriebnahme Wickelautomat																																								
2.4.7	Aufbau und Inbetriebnahme Schweißanlage für Ableiter																																								
2.4.8	Aufbau und Inbetriebnahme LASER (Schweißen Deckel/Becher)																																								
2.4.9	Aufbau und Inbetriebnahme Elektrolybefüllungs-Anlage																																								
2.4.10	Aufbau und Inbetriebnahme Formationsanlage																																								
2.4.11	Aufbau und Inbetriebnahme Prüffeld																																								
2.4.12	Aufbau und Inbetriebnahme Trockenraumerweiterung																																								
2.4.13	Modifizierung Rollenschiere																																								
2.4.14	Aufbau und Inbetriebnahme Bandrockner																																								
MS3	- Aufbau der Versuchsanlagen ist abgeschlossen - Inbetriebnahme der Versuchsanlagen ist erfolgt																																								
2.5	Einfahren der Versuchsanlagen																																								
MS4	- Versuchsanlagen sind eingefahren																																								
2.6	Erstellung eines Zell-Lastenheftes für die 60Ah-Großserie (Kostenziel < 200 €/kWh)																																								
2.7	Musterbau von runden und prismatischen 30-40Ah-Forschungs-Versuchszellen																																								
2.7.1	Musterbau von Rundzellen																																								
2.7.2	Musterbau von prismatischen Zellen																																								
2.8	Erforschung der Fertigungsmethodik für runde und prismatische 30-40Ah-Zellen auf Basis dreier Zellchemiesysteme																																								
2.8.1	Erforschung der Fertigungsmethodik für Rundzellen																																								
2.8.2	Erforschung der Fertigungsmethodik für prismatische Zellen																																								
2.9	Erarbeitung erster Qualitätssicherungs-Konzepte																																								
MS5	- Erforschung der Fertigungsmethodik für 30-40 Ah-Zellen ist abgeschlossen - runde u. prismatische 30-40Ah-Forschungsversuchs-Zellen liegen vor - Lastenheft für Großserie (Kostenziel < 200 €/kWh) ist erstellt																																								

Tabelle 3: Gantt-Diagramm zu den Arbeiten im Rahmen des Arbeitspaketes 2

Besonderes Augenmerk soll schon an dieser Stelle auf die Erreichung des Kostenzieles für die Herstellkosten gelegt werden, da dies von zentraler Bedeutung ist. Es wurden die Investitionen und Herstellkosten mit Hilfe eines Kostenmodells abgeschätzt. Dieses Kostenmodell kann eine Grundlage für einen Business-Plan bilden und wird nachfolgend skizziert.

### **Erstellung eines Business Plans: Abschätzung von Investitionen und Herstellkosten**

#### Einleitung

Neben der Optimierung der technologischen Produkteigenschaften ist die Darstellung wettbewerbsfähiger Herstellkosten von großer Bedeutung für den Erfolg der Elektromobilität. Nur wenn die ehrgeizigen Kostenziele erreicht werden, können Hybrid- und Elektrofahrzeuge zukünftig in wirtschaftlich relevanten Stückzahlen abgesetzt werden. Derzeit sind die hohen Herstellkosten von geeigneten Lithium-Ionen-Batterien allerdings vor allem durch hohe Ausschussraten, niedrige Produktionsvolumina und den Einsatz kostspieliger Materialien geprägt.<sup>1</sup>

Vor diesem Hintergrund ist es bedeutend, den Herstellprozess und die Kostenstruktur von Batteriezellen intensiv zu analysieren, um damit Rückschlüsse auf die wirksamen Stellhebel der Kostenoptimierung zu ziehen. Um eine Großserienproduktion inklusive der aufwendigen und sensiblen logistischen Kette erfolgreich zu etablieren, ist ein im Vorfeld erforschtes Fertigungskonzept notwendig.

Im Rahmen der Forschungsarbeit wird mithin die gesamte Herstellungskette von Batteriezellen auch unter Kostengesichtspunkten analysiert. Um alle kostenrelevanten Einflüsse systematisch abbilden zu können, wird dabei zunächst jeder Prozessschritt einzeln betrachtet und in einem Ersatzschaltbild dokumentiert. Durch die schrittweise Integration der Einzelbilder entsteht ein detailliertes Schaltbild des Gesamtprozesses, das alle wechselseitigen Beziehungen und Einflussgrößen enthält.

Auf Basis dieser ganzheitlichen Darstellung kann der Herstellungsprozess mit Hilfe einer Tabellenkalkulation sukzessive in ein verkettetes, modulares Rechenmodell überführt werden. Aus der gewünschten Ausbringungsmenge errechnen sich die erforderlichen Materialströme und Kapazitätsanforderungen für die Fertigung. Abbildung 10 stellt die wesentlichen Eingangsparameter des Modells dar und illustriert die daraus gewonnenen Ergebnisse.

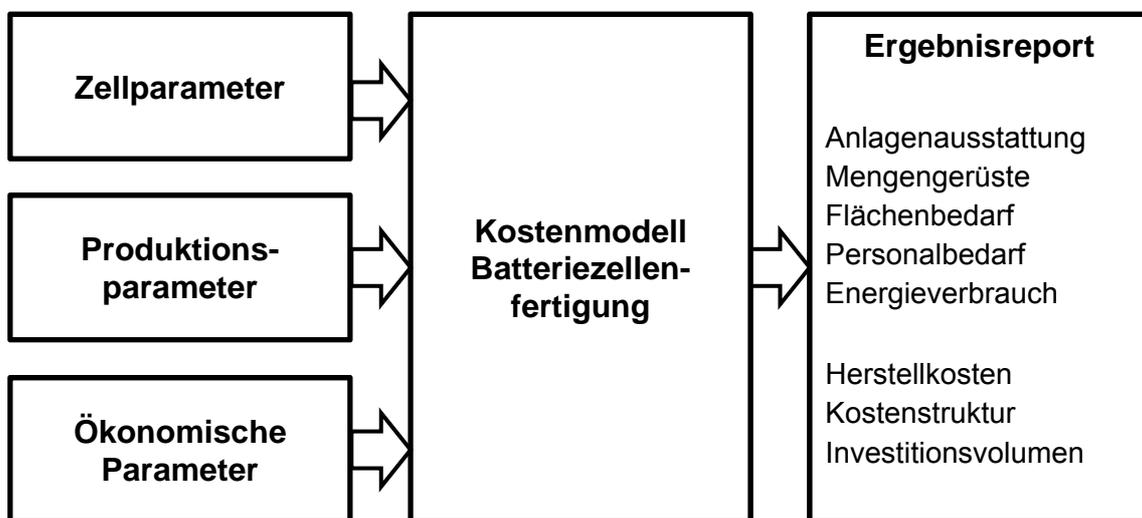


Abbildung 10: Eingangsparameter und Ergebnisausgabe des Kostenmodells<sup>2</sup>

Für die Anwendung des generischen Rechenmodells in einem realistischen Fertigungsumfeld, muss das Modell mit belastbaren Eingangsdaten parametrisiert werden. Das heißt, es müssen reale Maschinenparameter, Ausschussraten, Material- und Anlagenpreise sowie Personalbedarfe evaluiert, berechnet oder geschätzt werden. Als Datenquellen dienen beispielsweise Lieferantenangebote, Rohstoffnotierungen, Feldstudien, Expertenwissen und Empirie aus der Forschungsversuchslinie der VOLKSWAGEN VARTA Microbattery GmbH & Co. KG.

Mit Hilfe des parametrisierten Rechenmodells werden anschließend Herstellkostenprognosen und Sensitivitätsanalysen abgeleitet, so dass der zukünftige Herstellungsprozess hinsichtlich Investitionsumfang und Betriebskosten quantitativ bewertbar wird. Auf diese Weise wird auch die

Beurteilung alternativer Prozesspfade oder Fertigungstechnologien unter Kostengesichtspunkten ermöglicht.

Hieraus lassen sich wichtige Aspekte der Fabrikplanung ableiten, wie beispielsweise Fertigungslayout, Dimensionierung von Transportkapazitäten und Lager sowie Abschätzung von Flächen- und Personalbedarf.

#### Kalkulationsgrundlagen und Prämissen

Aus den gewonnenen Erkenntnissen der Erforschung von Zellchemie und Fertigungsmethodik lässt sich eine Batteriezelle definieren, die für die angestrebte Industrialisierung aus heutiger Sicht besonders vielversprechend erscheint. Diese Zelle bildet in Verbindung mit dem zugehörigen Lastenheft die Grundlage für die nachfolgende Kostenkalkulation.

Für die Kostendarstellung soll exemplarisch eine NMC-Batteriezelle in dem für Traktionsanwendungen gängigen Format PHEV2 verwendet werden. Abbildung 11 zeigt die kalkulierte Kostenverteilung bei der Herstellung einer solchen Zelle als prismatische Wickelzelle.

Ferner liegen der Kalkulation die nachfolgenden Prämissen zugrunde:

- Jahresproduktion von 20 Mio. Batteriezellen
- kontinuierlicher 24-Stundenbetrieb (Dreischichtmodell) bei 360 Betriebstagen pro Jahr
- Fertigungsstandort: Deutschland
- Zellchemie: C/NMC
- Format: gewickelte PHEV2

Neben den Einflussgrößen, die sich direkt aus der Gestaltung der Batteriezelle (Zellparameter) oder den ökonomischen Rahmenbedingungen (ökonomische Parameter) ergeben, sind insbesondere die Produktionsparameter für die zu erwartenden Herstellkosten maßgeblich. Daher werden alle Prozessparameter aus dem erstellten Fließschema systematisch definiert und gehen als Eingangsgrößen in das Kalkulationsmodell ein. Um den gesamten Prozess ganzheitlich und gleichermaßen detailliert modellieren zu können, muss der Prozess in seinen Einzelschritten betrachtet und unter Berücksichtigung der prozessübergreifenden Wechselwirkungen aufgearbeitet werden. Zu jedem Prozessschritt wird ein Tabellenblatt angelegt, auf dem zunächst die prozesstypischen Maschinenparameter einer Einzelanlage aufgeführt sind. Diese Parameter charakterisieren die technische Leistungsfähigkeit der Maschine, aus denen sich alle wesentlichen Kenngrößen als Derivate ergeben. Je nach Prozessschritt sind verschiedene Parameter für die Modellierung der Maschine zu berücksichtigen. Als durchgängig obligatorisch können für fast alle Produktionsschritte folgende Parameter genannt werden:

- Produktionsgeschwindigkeit bzw. Dauer
- Arbeitsbreite bzw. -volumen
- Personalbedarf im Betrieb
- Durchschnittlicher variabler und fixer Ausschuss
- Leistungsaufnahme
- Abmessungen der Anlage
- Anschaffungskosten der Anlage

#### Ergebnisse und Bewertung

Nach der im vorherigen Abschnitt vorgestellten Parametrisierung, liefert das Kostenmodell nun den Investitionsbedarf der angestrebten produktionstechnischen Anlage sowie die korrespondierenden Herstellkosten. Demnach betragen die erforderlichen Investitionen für eine Fabrik für NMC-Batteriezellen mit einer Fertigungskapazität von 20 Mio. PHEV2-Batteriezellen pro Jahr voraussichtlich 500 Mio. €. Unter den oben genannten Prämissen resultieren daraus Herstellkosten in Höhe von etwa 266 €/kWh.

Neben diesen Primärergebnissen gibt das Modell darüber hinaus Auskunft über die prognostizierte Anlagenausstattung, Personal- und Flächenbedarfe, Mengengerüste und Energieverbrauch. Diese Informationen können in eine detailliertere Layout- und Fertigungslinienplanung einfließen.

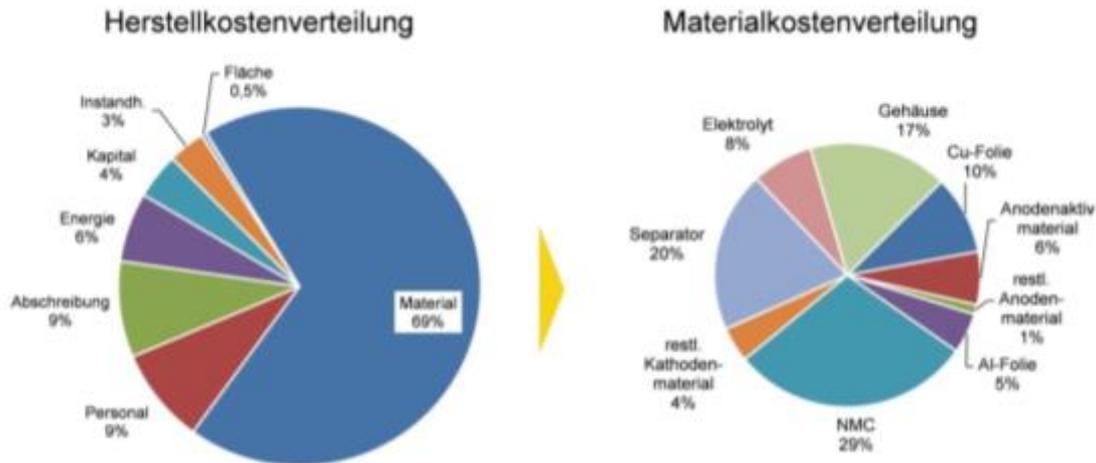


Abbildung 11: Herstellkosten- und Materialeinzelkostenverteilung einer NMC-Batteriezelle<sup>2</sup>

Wie aus Abbildung 11 ersichtlich, dominieren die Materialkosten mit einem Anteil von ca. 69 % die Herstellkosten der betrachteten NMC-Batteriezelle. Weitere wesentliche Kostentreiber sind der Einsatz von Personal (9 %) und ökonomische Abschreibungen auf das Anlagevermögen (9 %).

Innerhalb der Kostenart Material repräsentieren das Kathodenaktivmaterial (NMC, 29 %), der Separator (20 %) und die Gehäuseteile (17 %) die größten Kostenblöcke (vgl. rechtes Tortendiagramm in Abbildung 12). Auffällig ist hierbei, dass die Kathode in Summe etwa 38 % der Materialeinzelkosten ausmacht (Aktivmaterial + restl. Material + Folie), während die Anode mit nur 17 % zu Buche schlägt. Ursächlich hierfür ist der im Vergleich zur Anode hohe Einkaufspreis für Aktivmaterial. Ebenso liegen die Beschaffungspreise für geeignete Separatoren und Gehäuseteile auf einem hohen Niveau.

Über die Materialkosten eröffnet sich aufgrund ihres hohen Anteils an den Gesamtkosten das größte Kostenreduktionspotential. Mögliche Maßnahmen sind die Qualifizierung preiswerter Materialien bzw. Materiallieferanten, Reduktion der Ausschussmengen und Einsatz alternativer Aktivmaterialien. Die wesentliche Kostendegression wird durch die Einkaufspreisreduzierung des Materials erreicht. Aber auch über die Umsetzung technischer Optimierungen und durch Lernkurveneffekte in der Fertigung lassen sich Herstellkosten weiter reduzieren.

Mit Hilfe des Kostenmodells konnte auf Grundlage des dargestellten Herstellungsprozesses gezeigt werden, dass die Zielherstellkosten eine ambitionierte Marke darstellen. Nichtsdestotrotz liegt in der Wertschöpfungskette der Batteriezellenfertigung sowie in der vorgelagerten Materialherstellung weiteres Potential zur Kostenreduktion, das durch konsequente Prozessoptimierung gehoben werden kann.

### Untersuchung von Rohstoff- und Materialkosten am Beispiel NMC

#### Ausgangssituation

Die hohen Herstellkosten der Li-Ionen-Batteriezelle sind ein Hinderungsgrund bei der zukünftigen Durchsetzung der Elektromobilität. Dabei sind Herstellkosten von Li-Ionen-Batteriezellen wie oben dargestellt maßgeblich materialkostengetrieben (69 % der Herstellkosten). Eine Fokussierung auf die Materialkosten ist daher sachgemäß.

Der Großteil der Materialkosten wird dabei durch die Komponenten Kathodenaktivmaterial, Separator, Gehäuse, Kupferfolie sowie Elektrolyt beigesteuert. In Abhängigkeit von der Zellchemie und dem Batteriezelltyp verursachen die Kathodenaktivmaterialien ca. 30 % der Materialkosten.<sup>3,4</sup> Der Grund liegt vor allem in den teuren Rohstoffen wie Lithium, Cobalt, Nickel und Mangan, die zur Herstellung des Kathodenaktivmaterials notwendig sind. Im Zuge der Ausweitung der Elektromobilität kann dieses Problem weiter verschärft werden, da die Verfügbarkeit der angesprochenen Rohstoffe erschöpfbar ist und somit der Preis weiter steigen könnte.

Nachfolgend soll daher neben der Untersuchung des Einflusses von volatilen Rohstoffpreisen auf die Materialkosten der Kathodenaktivmaterialien auch eine Studiauswertung bzgl. der zukünftigen Verfügbarkeiten von Lithium, Cobalt, Nickel und Mangan gegeben werden.

### Einfluss von volatilen Rohstoffpreisen auf die Kathodenaktivmaterialkosten am Beispiel NMC

NMC basiert auf vier Rohstoffen: Lithiumcarbonat, Cobalt, Nickel und Mangan.

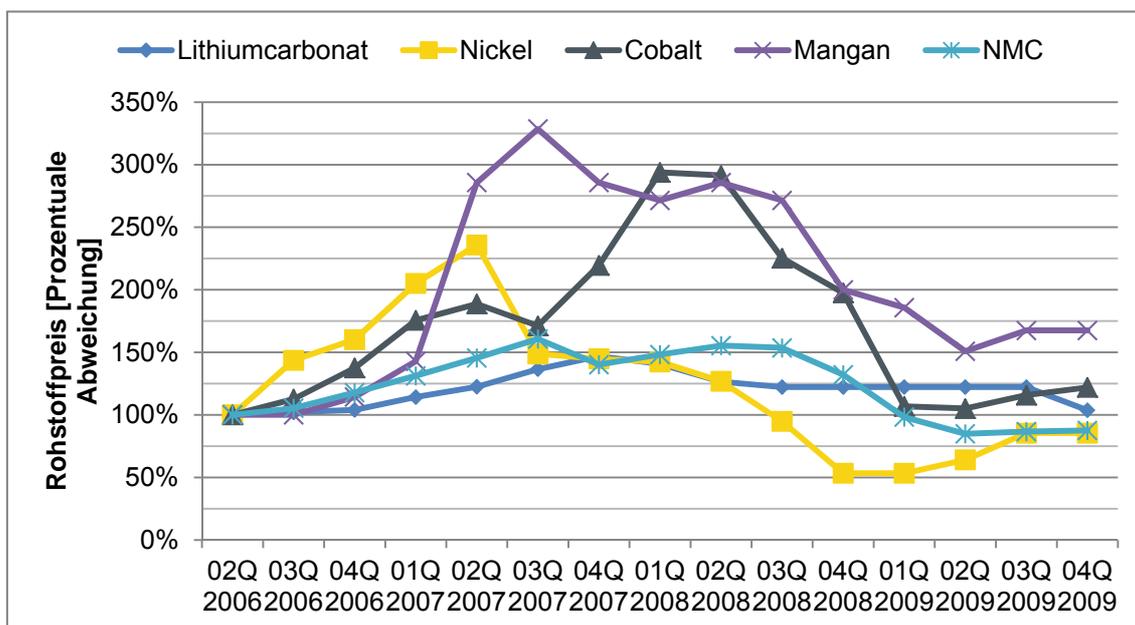


Abbildung 12: Preisverlauf von Lithiumcarbonat, Cobalt, Nickel, Mangan und NMC

Abbildung 12 stellt den Preisverlauf von Lithiumcarbonat, Cobalt, Nickel, Mangan und NMC im Zeitraum 2006 bis 2009 dar. Auffällig ist dabei der gleichgerichtete Verlauf der Graphen, der der Tatsache geschuldet ist, dass sich Preistrends immer auf mehreren Rohstoffmärkten durchsetzen, da zumeist eine Fundamentalursache wie z.B. konjunkturelle Veränderungen für die Volatilität verantwortlich ist. Eine weitere Auffälligkeit in Abbildung 12 ist die im Vergleich zu den Rohstoffen geringste relative Veränderung des NMC-Preises. Die Rohstoffebene ist die niedrigste Aggregationsstufe, mit jeder Stufenerhöhung z.B. auf die Komponentenebene kommen weitere Kostenpositionen und preisbestimmende Faktoren hinzu, die die Auswirkungen der Rohstoffpreisänderungen abschwächen können. So dient der Gewinn für den Batteriehersteller als Puffer zum Schutz vor stark gestiegenen Rohstoffpreisen, die nicht eins zu eins an den Abnehmer des Kathodenaktivmaterials weitergegeben werden können.

#### **Trendprognose**

Die vorherigen Unterkapitel haben den Einfluss von schwankenden Rohstoffpreisen auf die Komponentenebene der Kathodenaktivmaterialien verdeutlicht. Zur Abschätzung des Preistrends der Kathodenaktivmaterialien wird nachfolgend eine zusammenfassende Auswertung des Studienergebnisses hinsichtlich deren Verfügbarkeit gegeben.

#### Cobalt

ANGERER ET AL. prognostizieren einen Anstieg des Cobaltbedarfes infolge der Elektromobilität im Zeitraum 2006 bis 2030 von lediglich 70 %. Der Bedarf an Cobalt kann dabei weitestgehend durch Primärcobalt in Kombination mit Recycling gedeckt werden.<sup>5</sup>

#### Mangan

Der Manganpreis wird maßgeblich durch die Nachfrage der Stahlindustrie bestimmt. Da große Vorkommen auf dem Festland und im Pazifik vorhanden sind, wird zukünftig nicht von einer Manganknappheit ausgegangen.<sup>6</sup>

#### Nickel

Trotz der starken Bedarfssteigerung bei Nickel in der Vergangenheit, ist das Preisniveau gleichgeblieben. Aufgrund der großen Vorkommen gehen Experten davon aus, dass es auch in Zukunft nicht zu einer Knappheit kommen wird.<sup>7</sup>

## Lithium

ANDERSON prognostiziert einen Anstieg des Lithiumbedarfs für den gesamten Batteriesektor von 14 % p. a. zwischen 2010 und 2020.<sup>8</sup> Abschätzungen zur Folge wird es langfristig (>2040) nicht zur einer Knappheit kommen.<sup>9,10,11</sup>

### **Erwartete Kostendegression für verschiedene Komponenten**

Neben dem zuvor gezeigten exemplarischen Beispiel des Kathodenaktivmaterials NMC, werden nun Kostendegressionsprognosen für weitere kostenbestimmende Komponenten durchgeführt. Im Zuge dessen, müssen die verschiedenen Komponenten zwischen rohstoffkosten- und fertigungskostengetriebene Komponenten unterschieden werden. Unter die Kategorie der rohstoffkostengetriebenen Komponenten fallen hauptsächlich die Kathodenaktivmaterialien wie das zuvor gezeigte NMC. Die hohen Selbstkosten der Komponente sind dabei maßgeblich durch die teuren Grundrohstoffe wie z.B. Cobalt oder Nickel bestimmt. Die Kategorie der fertigungskostengetriebenen Komponenten umfasst z.B. den Separator oder die Anodenaktivmaterialien. In diesem Rahmen verursacht der Fertigungsprozess die größten Kosten.

Die Preisprognose für rohstoffkostengetriebene Komponenten gestaltet sich deutlich einfacher als die der fertigungskostengetriebenen Komponenten. Ursächlich dafür ist die gute Datenverfügbarkeit, da die Grundrohstoffe an öffentlichen Marktplätzen wie z.B. der Londoner Metal Exchange gehandelt werden. Die Beschaffung von Informationen zu den Fertigungsprozessen einzelner Komponenten gestaltet sich indes, aufgrund der Geheimhaltung der Hersteller, deutlich schwieriger. Nachfolgend soll deswegen für eine Kostendegressionsprognose auf Studienwerte referenziert werden:

<b>Komponente</b>	<b>Kosten 2011 [%]</b>	<b>Kosten 2015 [%]</b>
Kathodenaktivmaterial	100	80-85
Anodenaktivmaterial	100	85
Elektrolyt	100	80
Separator	100	90-95
Andere Komponenten	100	100

Tabelle 4: Erwartete Kostendegression für verschiedene Komponenten<sup>12</sup>

Tabelle 4 verdeutlicht die zu erwartende Kostendegression für das Jahr 2015. Die durchschnittliche Kostendegression liegt dabei in dem Bereich 10-20 %. Die Kostendegressionen können sich somit auch positiv auf die Li-Batteriezelebene auswirken.

### **2.2.1 AP 2.1 - Erstellung Lastenhefte der Anlagentechnik auf Basis der Zelllastenhefte (von 30Prof.40 Ah Zellen)**

Dauer: 01.07.2010 bis 31.12.2010

Wegen der zum Teil sehr langen Lieferzeiten von bis zu 10 Monaten wurden alle Unterarbeitspakete des Arbeitspaketes 2.1 („Erstellung Lastenhefte der Anlagentechnik auf Basis der Zelllastenhefte (von 30-40Ah-Zellen)“) gegenüber der Planung vorgezogen.

Nachfolgend ist in Abbildung 12 das Prozessschema, wie bereits im Förderantrag eingereicht, mit den wichtigsten Prozessschritten und Investitionen gemäß AZK4 bzw. Arbeitspaketen dargestellt.

Schlussbericht Zuwendungsempfänger  
Förderkennzeichen: 0327889 A

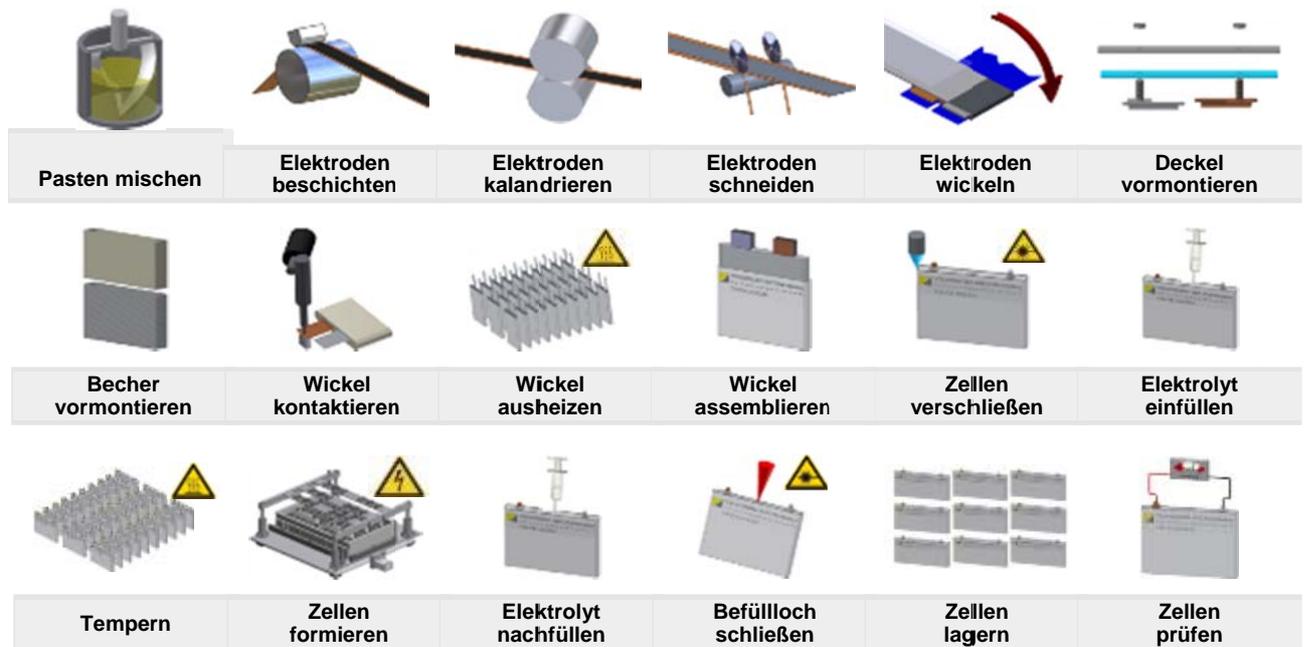


Abbildung 13: Prozessschema der Zellenherstellung mit den zu erforschenden Prozessen und zugehörigen Investitionen

Die durchgeführten Arbeiten zu den Arbeitspaketen AP 2.1.1. bis 2.1.9 sind in der nachfolgende Tabelle 5 zusammengefasst.

AZK 4 Nr.	AP	Anlagen-Bezeichnung	Ziele	Status & Ergebnisse
1	2.1.1	Trockenmischer	Mischen und Trockencoaten von Nano-Materialien mit Hochenergiemischern. <ul style="list-style-type: none"> <li>Kathode: Lithium-Eisenphosphat mit Graphiten und Rußen</li> <li>Anode: Nano-Silizium auf Graphit beschichten.</li> </ul>	Bisherige Versuche im Technikum der Anlagenhersteller und bei VOLKSWAGEN.  Kathode: Keine Verbesserung erzielbar, eher Verschlechterung. Anode: Keine Verbesserung erzielbar. Fazit: Keine Beschaffung des Trockenmischers.
2	2.1.5	Kalander (neu)	Herstellung hochverdichteter Elektroden basierend auf Nano-Materialien. Aufgrund der extrem hohen Oberfläche und geringen Schüttdichten sind Nano-Materialien nur schwer zu verdichten. Der Kalander muss auch intermittierend beschichtete Elektroden mit sehr hoher Präzision verdichten können.	Bei umfangreichen Vorversuchen konnte für das Lastenheft für einen Kalander sehr hohe Linienlasten spezifiziert werden. Als besondere Herausforderungen haben sich erwiesen: <ul style="list-style-type: none"> <li>Extrem präziser Rundlauf von <math>\leq \pm 1\mu\text{m}</math>.</li> <li>Steuerung der Pressung bei intermittierender Beschichtung</li> </ul> Fazit: Beschaffung des Kalanders durch Vorversuche abgesichert.
3		Laserschweißen Gehäuse (neu)	Wegen der sehr hohen Lebensdauieranforderung von min. 10 Jahren müssen die Zellen absolut dicht sein. Dies kann man mit einer Laserschweißtechnologie sicherstellen. Herausforderung ist dabei das Schweißen sehr dünner und unterschiedlichen Materialien. Der Laser muss sehr flexibel für unterschiedliche Formate (rund und prismatische) einsetzbar sein.	Bei umfangreichen Vorversuchen konnte das Lastenheft für einen 5-Achs-Laser mit sehr hohe Flexibilität spezifiziert werden. Als besondere Herausforderungen haben sich erwiesen: <ul style="list-style-type: none"> <li>Schweißleistung von 1000 Watt erforderlich, welche über einen großen Bereich geregelt werden kann.</li> <li>Wegen Betrieb im Trockenraum muss eine spezielle Absaugung eingesetzt werden.</li> </ul> Fazit: Beschaffung des Lasers durch Vorversuche abgesichert.

Schlussbericht Zuwendungsempfänger  
Förderkennzeichen: 0327889 A

AZK 4 Nr.	AP	Anlagen- Bezeich- nung	Ziele	Status & Ergebnisse
4	2.1.7	Elektrolyt- befüllung  (neu)	Elektrolytbefüllung unterschied- lichster Zellformate und Zellche- mien. Besondere Herausforderung sind: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Befüllung unter Trocken- raumbedingungen - nicht mehr in Glovebox.</li> <li>• Es soll erstmals eine Kombination aus Vakuum- und Überdruckbefüllung realisiert werden. Dabei muss eine Deformation der sehr dünnwandigen Gehäuse vermieden wer- den.</li> </ul>	Bei umfangreichen Vorversuchen konnte das Lastenheft für die Elektrolytbefüllung detailliert festgelegt werden. Dabei hat sich als besonders schwierig die Konstruktion der Vakuum- und Druckkammer, sowie deren elektrische Steuerung im gesamten Prozess, erwiesen. Es wurde im Vorfeld eine neuartige Methode ausgearbeitet, welche auf Patentierbarkeit geprüft wurde. Fazit: Beschaffung der Elektrolytbefüllung durch Vorversuche abgesichert.
5		Schredder  (neu)	Sichere und umweltfreundliche Entsorgung der Forschungszellen.	Der Shredder wurde im Projekt nicht beschafft.
6		Laser für flexibles Schneiden  (neu)	Ziel ist unterschiedliche Foliendi- cken und Folienmaterialien format- frei zu schneiden.	Bei umfangreichen Vorversuchen konnte das Lastenheft für den Laserplotter detailliert festgelegt werden. Im Wesentlichen handelt es sich um modifiziertes Standardgerät mit Feinst- und Aktivkohlefilter-Absaugung. Fazit: Beschaffung der Elektrolytbefüllung durch Vorversuche abgesichert.
7	2.1.9	Elek- trische Prüfan- lage  (neu)	Aufbau einer elektrischen Prüfan- lage für runde und prismatische Zellen bis 60Ah. Erstellung eines zugehörigen Si- cherheitskonzepts für Mitarbeiter und Umwelt.	Es wurden Lastenhefte für die Anlagentechnik spezifiziert und verabschiedet. Aufgrund der Kosten sowie besserer Konditionen bei Service- und Wartungsverträgen wurde ein deutscher Anbieter bei der Vergabe bevorzugt.
8	2.1.9	Temperier schränke  (neu)	Aufbau der Temperierschränke für runde und prismatische Zellen bis 60Ah für konstante Testbedingun- gen.  Erstellung eines zugehörigen Si- cherheitskonzepts für Mitarbeiter und Umwelt.	Es wurden Lastenhefte für die Anlagentechnik und Sicherheitseinrichtungen spezifiziert und verabschiedet.  Fazit: Beschaffung der Temperierschränke durch ein detailliertes Lastenheft abgesichert.
9		Umbau Sicher- heitsein- richtungen	Gesetzliche Richtlinien in Bezug auf Sicherheit der Anlagen und Emissionen müssen erfüllt sein. Aufgrund der hohen spezifischen Energie sind große Lithium-Ionen Batteriezellen als Gefahrgut einge- stuft.	Sicherheitskonzepte wurden erstellt, umgesetzt, abgenommen und in Betrieb genommen.
10	2.1.8	Umbau Formation 1	Vorhandene Formation für runde und prismatische Zellen bis 60Ah umbauen. Erstellung eines zugehörigen Si- cherheitskonzepts für Mitarbeiter und Umwelt.	Die Formation wurde in das verlagerte Hochregallager integriert und in Betrieb genommen.
11	2.1.8	Umbau Formation 2	Hierbei handelt es sich nur um die Verkabelung der Anlagen zur Zel- len-Kontaktierung.	Verkabelung abgeschlossen und termingerecht in Betrieb genommen.

AZK 4 Nr.	AP	Anlagen- Bezeich- nung	Ziele	Status & Ergebnisse
12	2.1.3	Umbau Vakuum Nass- mischer	Die zukünftige Technologie für die neu zum Einsatz kommenden Nanomaterialien muss erst erforscht werden. Eines der Hauptprobleme ist Vermeidung von Agglomeraten aufgrund der sehr hohen Oberflächenaktivität der Nano-Materialien.	Bisherige Versuche wurden überwiegend mit den vorhandenen Labormischern durchgeführt, dabei haben sich erhebliche Probleme durch Agglomerate gezeigt. REM-Aufnahmen zeigen, dass insbesondere die Nano-Materialien sehr inhomogen in der Beschichtung verteilt sind.  Fazit: Die Beschaffung eines dreiarmligen Vertikalknetzers war die beste Option zur Erreichung der hohen Anforderungen. Die Beschaffung wurde durch intensive Vorversuche beim Hersteller abgesichert.
13	2.1.4	Umbau Horizontal coater	Der vorhandene Horizontal-Coater soll nicht umgebaut werden. Begründung siehe AP1.1 „Orientierende Versuche Elektrodenbeschichtung“ und Schreiben vom 21.05.2010. Mit Änderungsbescheid des BMWi vom 27.05.2010 wurde dem stattgegeben.	Zusammen mit dem Hersteller wurden Vorversuche und detaillierte Lösungsansätze für intermittierende Beschichtung erarbeitet und ein umfangreiches Lastenheft zusammen erstellt. Fazit: Die Beschaffung des Beschichters wurde durch Vorversuche und ein detailliertes Lastenheft abgesichert.
14	2.1.6	Umbau Wickel- maschine	Erforschung Herstellung von Zellwickeln für automobiler Anwendungen. Besondere Herausforderungen sind: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Konzept für multiple Ableiter erarbeiten. Hierzu werden erstmals 4 Laser für Randbeschnitt eingesetzt.</li> <li>• Aus Kostengründen muss die Anlage sowohl runde als auch prismatische Wickel in besonders hoher Präzision herstellen können.</li> </ul>	Zusammen mit dem Hersteller wurden Vorversuche und detaillierte Lösungsansätze für flexibles Wickeln erarbeitet und ein umfangreiches Lastenheft zusammen erstellt. Fazit: Die Beschaffung des Wicklers wurde durch Vorversuche und ein detailliertes Lastenheft abgesichert.
15		Umbau Schweiß- maschinen	Erforschung der Anschweißtechnologie von Kollektoren an runden und prismatischen Zellen.	Fazit: Durch Vorversuche konnte nachgewiesen werden, dass der Umbau der vorhandenen US-Schweißtechnik nicht zielführend für das Projekt ist.
16 (neu)	neu	Erweite- rung Tro- ckenraum	Reduzierung Wassergehalt in den Elektroden.	In den Vorversuchen hat sich gezeigt, dass die Nano-Materialien aufgrund der hohen Oberflächenaktivität sehr hygroskopisch sind. Das adsorbierte Wasser lässt sich später wieder nur sehr aufwändig entfernen. Fazit: Der Nachweis besserer Zyklenfestigkeit und höherer Lebensdauer erfordert die Durchführung der Prozessschritte in Trockenluftatmosphäre (< 2% rel. Feuchte). Daher wurde ein Trockenraum beschafft.

Tabelle 5: Arbeiten zu den Arbeitspaketen AP 2.1.1. bis 2.1.9

### 2.2.2 AP 2.1.1 – Erstellung Lastenheft Trockenmischer

Dauer: 01.07.2010 bis 31.12.2010

Zur realitätsnahen Auslegung der Mischanlage wurde ein Hersteller von Mischtechnik kontaktiert. Im Rahmen dieser Zusammenarbeit konnte eine Zusammenstellung der wichtigsten trockenmischungsrelevanten Parameter aufgestellt werden. Diese Parameter waren die Grundlage für

die Durchführung von internen und externen Mischungsversuchen. Im Rahmen der Versuche konnte der Aufbau und die Art der Partikelbeanspruchung genau festgelegt werden. Gemeinsam mit dem Lieferanten konnte die Ausarbeitung der Zielgrößen für die konstruktive Umsetzung der Maschine mit integrierter Sicherheitstechnik abgeschlossen werden.

Die Formulierung des Lastenheftes mit allen qualitätsrelevanten Parametern unter Angabe der einzuhaltenden Toleranzen in Form eines Parameterfensters war der finale Schritt zum Lastenheft. Das Lastenheft wurde fristgerecht erstellt und liegt vor. Die Maschine wäre ähnlich der in Abbildung 14 dargestellte Maschine ausgeführt worden. Die wichtigsten Parameter sind:

- Kontaminationsfreie Befüllung und Entleerung über Doppelklappensystem
- Dosieröffnung für Lösungsmittel
- Schauglas mit Beleuchtung
- Edelstahlausführung im Werkstoff 1.4541
- Glatte Oberfläche 8 – 10 µm Rz
- Variabler Werkzeugsatz aus Horn, Bodenräumer und Fluidisierflügel
- Werkzeugdrehzahl bis 4000 U/min
- 9 Liter Bearbeitungsvolumen
- CE Kennzeichnung
- Unterdruckfestes Gehäuse bis 400 mbar
- Temperierbarer Doppelmantel bis 70 °C



Abbildung 14: Beispiel eines Trockenmischers der Fa. Zeppelin vom Typ FML 10

#### **2.2.2.1 AP 2.1.2 – Erstellung Lastenheft Maschinentechnik zur Herstellung von SiC-Komposit**

Dauer: 01.07.2010 bis 31.12.2010

Da bei Zerkleinerungsprozessen stets ein deutlicher Abrieb in der verwendeten Maschine erfolgt, muss die Mühle so ausgelegt werden, dass keine störenden Schwermetalle in die Dispersion ausgetragen werden. Diese Metalle können eine negative Auswirkung auf die Anode haben. Die Mahlbecher und das Rührwerk sind daher mit einer Polyurethanverkleidung versehen.

Die Rührwerkskugelmühle ist ein Durchflussgerät. Dadurch gibt es kein begrenzendes Volumen für die Ansatzgröße. Die Größe des Mahlraumes bestimmt jedoch das notwendige Mindestvolumen (Totraum) und die Mischkapazität (Durchsatz pro Zeiteinheit). Das Mahlraumvolumen wurde auf 2 l ausgelegt. So ist zum einen gewährleistet, dass keine überdimensionierten Versuchsansätze mit dem derzeit noch sehr teuren Nano-Silizium gefahren werden müssen. Zum anderen kann genügend Dispersion erzeugt werden, um die im Projekt geplanten Versuchszellmengen herzustellen.

Als Prozessmedium zur Herstellung der Siliziumdispersion ist Wasser vorgesehen. Dadurch konnte auf eine explosionsgeschützte Auslegung der Mühle verzichtet werden.

Aufzeichnung, Dokumentation und Auswertung der Prozessdaten sollte an einem separaten PC erfolgen können. Die Mühle verfügt über eine Siematic-Steuerung, die eine Verbindung zu einem externen Rechner via Profibus ermöglicht.

Das Lastenheft für die zu bestellende Maschine wurde erstellt. Das Arbeitspaket 2.1.2 wurde damit erfolgreich und termingerecht abgeschlossen.

### 2.2.2.2 AP 2.1.3 – Erstellung Lastenheft Nassmischer

Dauer: 01.07.2010 bis 31.12.2010

Das Ziel des Arbeitspakets war die Erstellung eines Lastenheftes für einen Doppelplanetenmischer für Versuchszwecke, der ein Nassmischergebnis in reproduzierbarer Qualität unter Einhaltung der arbeitsschutzrechtlichen, sicherheitsrechtlichen und umweltschutzrelevanten Bestimmungen liefert.

Zur realitätsnahen Auslegung der Mischanlage wurde ein Hersteller von Mischtechnik kontaktiert. Das Lastenheft wurde fristgerecht erstellt und liegt vor. Die Maschine wurde ähnlich der in Abbildung 15 dargestellte Maschine ausgeführt. Die wichtigsten Parameter sind:

- Befüllungsstutzen für Schutzgas
- Schauglas mit Beleuchtung
- Edelstahlausführung im Werkstoff SUS 316 L
- Polierte Oberflächen, Spiegeleffekt
- Mischwerkzeugsatz bestehend aus 2 Dissolvern auf einer Welle und 2 getrennten Knetwerkzeugen
- Werkzeugdrehzahl Dissolver bis 11.000 U/min
- Werkzeugdrehzahl Knetblätter bis 110 U/min
- Umlaufdrehzahl bis 50 U/min
- 2 - 5 Liter Bearbeitungsvolumen
- CE Kennzeichnung
- Unterdruckfestes Gehäuse
- Druckanzeige
- Vakuumpumpe und Vakuumanschluss im Deckel
- Belüftungsöffnung
- Temperierbarer Doppelmantel bis 70 °C



Abbildung 15: Beispiel eines lastenheftkonformen Doppelplanetenmischers

### 2.2.2.3 AP 2.1.4 – Erstellung Lastenheft Beschichtungsanlage Elektroden

Dauer: 01.07.2010 bis 31.12.2010

Das Ziel des vorliegenden Arbeitspaketes war die Erstellung eines Lastenheftes für eine Beschichtungsmaschine, die im skalierbarem Labormaßstab enge Toleranzen in der Quer- und Längsverteilung sowie im auftragbarem Gesamtflächengewicht erfüllt. Die Beschichtungsanlage muss vollflächige und intermittierende Beschichtungen, ein und beidseitig in den genannten Toleranzen ermöglichen.

Zur realitätsnahen Auslegung der Beschichtungsanlage wurde eine Zusammenstellung der wichtigsten beschichtungsrelevanten Parameter erstellt. Diese Parameter waren die Grundlage für die Durchführung von internen und externen Beschichtungsversuchen. Im Rahmen dieser Versuche konnte der Aufbau und das Zusammenspiel der Bauteile genau festgelegt werden. Die Betreuung im Technikumsversuch und die präsentierten technischen Lösungen ermöglichten es, die Entscheidung für einen Lieferanten zu treffen. Im Rahmen der Gespräche mit dem Lieferanten konnte die Ausarbeitung der konstruktiven Umsetzung der Maschine mit integrierter Trocknungs- und

Sicherheitstechnik abgeschlossen werden. Im Zentrum des Arbeitspaktes standen die fertigungsvorbereitenden Versuche, in Folge derer die exakte Spezifikation der Maschine partnerschaftlich erarbeitet werden konnte.

Die Formulierung des Lastenheftes mit allen qualitätsrelevanten Parametern unter Angabe der einzuhaltenden Toleranzen in Form eines Parameterfensters war der finale Schritt zum Lastenheft. Das Lastenheft wurde fristgerecht erstellt und liegt vor. Die Maschine wird ähnlich der in Abbildung 16 dargestellte Maschine ausgeführt. Die wichtigsten Parameter, die auch Gegenstand der Abnahme waren, sind:

- Vollflächige, ein- und beidseitige Beschichtung
- Intermittierende, ein- und beidseitige Beschichtung
- Beschichtung von 15 µm dicker Aluminiumfolie und 10 µm dicker Kupferfolie
- Maximales einseitiges Flächengewicht der Kathode von 190 g/m<sup>2</sup> und der Anode von 120 g/m<sup>2</sup>
- Einhaltung einer Flächengewichtstoleranz für alle Beschichtungen von +/- 1 % quer und längs zur Beschichtungsrichtung
- Auslegung des Trockners auf die maximale Bandgeschwindigkeit von 7,5 m/min
- Sicherheitstechnik zur Überwachung der Explosionsgrenze im Trockner
- Einbindung in das Sicherheitskonzept des Beschichterraumes
- CE-Kennzeichnung der Gesamtanlage



Abbildung 16: Schematische Darstellung der Komponenten einer lastenheftkonformen Beschichtungsanlage

#### 2.2.2.4 AP 2.1.5 – Erstellung Lastenheft Kalandrieren

Dauer: 01.07.2010 bis 31.12.2010

Die Erstellung eines Lastenheftes für einen Kalandrieren, der im skalierbaren Labormaßstab enge Toleranzen der Verdichtung von vollflächig und intermittierend gefertigten Elektroden erfüllt, war das Ziel dieses Arbeitspaketes.

Es wurden alle verdichtungsrelevanten Parameter ermittelt, Gesprächen mit Lieferanten geführt, Kalandrierungsversuchen intern im Hause VW-VM auf den vorhandenen Anlagen und extern im Technikum des Lieferanten durchgeführt. Nach dem Vorliegen der Ergebnisse der Verdichtungsversuche konnten detaillierte Konstruktionsgespräche mit Lieferanten der engeren Auswahl geführt werden, in denen die Umsetzung der Ergebnisse in technischen Lösungen geplant wurde. Im Rahmen der partnerschaftlichen Ausarbeitung der technischen Lösung mit dem Lieferanten der Wahl, konnten die qualitätsrelevanten Zielgrößen für einen projektkonformen Kalandrieren abgeleitet werden.

Die Formulierung aller qualitätsrelevanten Parameter unter Angabe der einzuhaltenden Toleranzen in Form eines Parameterfensters war der finale Schritt zum Lastenheft. Das Lastenheft wurde fristgerecht erstellt und liegt vor. Die wichtigsten Parameter sind:

- Kalandrieren von beidseitig beschichtete Elektrodenbändern (Anode und Kathode) für prismatische Zellen von (lxbxh) 80 mm x 50 mm x 10 mm bis 174 mm x 165 mm x 32 mm

- Kalandrieren von beidseitig beschichtete Elektrodenbändern (Anode und Kathode) für runde Zellen von ( $\varnothing \times h$ ) 16 mm x 50 mm bis 72 mm x 150 mm
- Spaltüberwachung zur Absicherung der Maschine über Software für intermittierende und kontinuierliche Beschichtung
- Berührungslose Dickenmessung
- Automatische Abschaltung bei Bandriss, Bandende und Beschichtungslücken
- Rundlaufgenauigkeit der Kalandrierwalzen
- Oberflächenrautiefe
- Einstellgenauigkeit
- Maximale Anstellkraft
- CE Kennzeichnung
- Vollautomatischer Betrieb
- Walzenbreite 600 mm
- Walzendurchmesser 500 mm

#### 2.2.2.5 AP 2.1.6 – Erstellung Lastenheft für Wickelautomat

Ziel dieses Arbeitspaketes war, die Erstellung eines Lastenheftes für den Umbau einer bei VARTA Microbattery GmbH installierten Elektrodenfertigungsanlage, zu einem neuartigen Wickelautomaten zur Erforschung neuer Fertigungsmethoden zur Herstellung von Elektrodenwickeln. Der Ansatz war Wickel- und Ableiter-Geometrien mittels flexibler LASER-Schnittoperationen auf einer Anlage herstellen zu können. Eine derartige hochflexible Anlage wurde nach bisherigen Kenntnissen und Recherchen noch nicht gebaut.

Aufgrund der hohen Anforderungen an automobile Zellen war die Erforschung unterschiedlicher Wickeldesigns enorm wichtig, um Wettbewerbsvorteile durch optimierte Raumausnutzung (= hohe Energiedichte) und höchste Robustheit (= hohe Lebensdauer) erzielen zu können. Da die Prozesse skalierbar sein müssen, musste die Anlage so ausgelegt sein, dass die bereits in Vorversuchen absehbar schwierigen Prozesse, weitgehend als automatischer Prozess nachgewiesen werden konnte.

Die wichtigsten Punkte des Lastenheftes zur Erforschung sind:

- Konzept für multiple Ableiter erarbeitet. Hierzu werden erstmals 4 Laser für Randbeschnitt eingesetzt
- Komplexes Steuerprogramm für progressive Lasersteuerung erforderlich, gekoppelt mit einer hochpräzisen, optischen Geometrie-Abfrage an der Aufwickelstation.
- Aus Kostengründen muss die Anlage sowohl runde als auch prismatische Wickel in besonders hoher Präzision herstellen können.
- Weitgehend vollautomatische Abläufe für höchste Präzision.
- Wickelherstellung mit und ohne Dorn.

Weitere Anforderung an die Maschine:

- Herstellung prismatischer Wickel von (L x B x H) 80 mm x 50 mm x 10 mm bis 174 mm x 165 mm x 32 mm
- Herstellung runder Wickel von ( $\varnothing \times H$ ) 16 mm x 50 mm bis 72 mm x 150 mm
- Flexibles Schneiden der Ableitergeometrie (Abbildung 18)
- Dicken und Durchmessertoleranz von  $\pm 0,1$  mm
- Versatztoleranzen der Ableiter 0,5 mm
- Sensible Bandspannungseinstellungen für alle Bänder
- Frei programmierbar
- CE Kennzeichnung
- Absaugung mit Kohlefilter
- Laser mit 50 Watt Leistung
- Je ein Wickelkopf für runde und prismatische Wickel
- Automatischer Betrieb mit Magazin für ca. 50 Teile
- Maschine mit automatischer Bandausrichtung mittel optischer Sensoren
- Betrieb mit intermittierend beschichteten- und voll beschichteten Elektroden
- Die Maschine wird im Trockenraum in Halle 15.1 aufgestellt
- Maße der Maschine L x B x H (9500 x 2500 x 2400 mm)



Abbildung 17: Darstellung des Elektrodenautomaten für den Umbau zur Wickelmaschine.

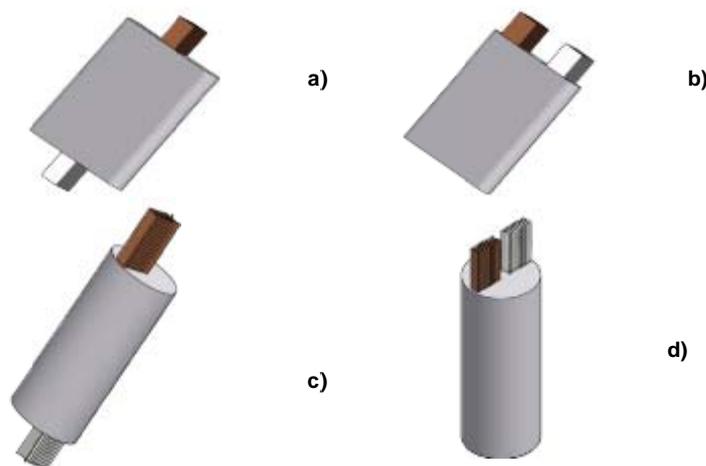


Abbildung 18: Beispieldarstellungen unterschiedlich realisierbarer Wickel-Designs: a) Prismatisch, gegenläufige Ableiter, b) Prismatisch, gleichläufige Ableiter, c) Rund, gegenläufige Ableiter, d) Rund, gleichläufige Ableiter.

#### 2.2.2.6 AP 2.1.7 – Erstellung Lastenheft Elektrolytbefüllung

Ziel dieses Arbeitspaketes war, die Erstellung eines Lastenheftes für die Elektrolytbefüllung unterschiedlicher Zellformate und Zellchemien. Zusammen mit den Zulieferern wurden detaillierte Lösungsansätze erarbeitet. Dabei haben sich als besonders schwierig die Konstruktion der Vakuum- und Druckkammer, sowie deren elektrische Steuerung im gesamten Prozess, erwiesen. Mit einem Zulieferer wurde eine neuartige und kostengünstigere Methode ausgearbeitet.

Spezifizierte Anforderungen an die Befüllstationen waren:

- Befüllung prismatischer Zellen von (L x B x H) 80 mm x 50 mm x 10 mm bis 174 mm x 165 mm x 32 mm
- Befüllung runder Zellen von ( $\varnothing$  x H) 16 mm x 50 mm bis 72 mm x 150 mm
- Befüllung mit und ohne Vakuum
- Befüllung mit und ohne Druck
- Befüllung mit geringen Fülltoleranzen
- Schutz der Berstmembran bei Vakuum und Unterdruck
- Halbautomatischer Betrieb

- Füllzyklen frei programmierbar (Zeit, Druck, Volumen)
- CE Kennzeichnung
- Beständigkeit gegen unterschiedlichste Elektrolyt Rezepturen
- Halbautomatische Maschine mit 2 Füllstationen
- Maschine mit zwei Pumpen für große bzw. kleine Füllvolumen
- Zwei Dosiersysteme für drucklose Befüllung und für Überdruckbefüllung
- Prozessabläufe frei programmierbar
- Geeignet für Druckbereich von -1 bar bis +6 bar
- Die Maschine wird im Trockenraum in Halle 15.1 aufgestellt
- Maße der Maschine L x B x H (1090 x 1060 x 1750 mm)

### **2.2.2.7 AP 2.1.8 – Erstellung Lastenheft Formationsanlage**

Dauer: 01.07.2010 bis 31.12.2010

Ziel der Auslegung war die parallele Formation von 300 runden bzw. prismatischen Zellen. Die Zellkapazität liegt zwischen 5 und 60 Ah. Die Formation musste in einem modular aufgebauten Lager erfolgen, das optional auf einen vollautomatischen Betrieb aufgerüstet werden kann. Der gesamte Formationsraum musste klimatisierbar sein, um die Formationstemperatur zwischen 20 und 25 °C zu gewährleisten zu können.

Folgende Eckdaten wurden im Lastenheft verankert:

- Parallele Formation von 300 runden bzw. prismatischen Zellen.
- Die Zellkapazität liegt zwischen 5 und 60 Ah.
- Formationstemperatur zwischen 20 und 25 °C
- Umrüstbar auf vollautomatischen Betrieb
- Lade/Entladestrom : 0,02 – 20 A
- Genauigkeit: 0,2 %
- Messrate U und I:  $\leq 100$  ms
- Steuerung über einen Leitrechner
- Speicherung aller Daten in einer Datenbank
- Bedienung über grafische Benutzeroberfläche
- Menüführung mit Windows Konvention
- Multiuser Betrieb
- Modularer Aufbau in 19 " Schränken
- Temperaturmessung für jeden Kanal
- 3. Ausführung der Anlage
- Item-Profillager mit Regalbediengerät
- Klimaanlage
- Digatronkonstanter

### **2.2.2.8 AP 2.1.9 – Erstellung Lastenhefte Prüffeldanlagen**

Dauer: 01.07.2010 bis 31.12.2010

#### **Ziel**

Parallele Zyklisierung von 220 runden bzw. prismatischen Zellen mit Kapazitäten zwischen 30 und 60 Ah bei einer konstanten, frei wählbaren Temperatur zwischen - 40 und + 120 °C und Stromstärken im Bereich von 0,5 bis 500 A. Aus Sicherheitsgründen und um die Temperatur exakt zu gewährleisten, müssen die Zellen in Temperaturschränken mit CO<sub>2</sub> Löschanlage zyklisiert werden.

#### **Anforderung an die Geräte**

- Integration in den Formationsraum (12,42 \* 11,14 \* 8,10 m)( L\*B\*H)
- Klimatisierung mit 6000 m<sup>3</sup>/h
- 210 Kanäle maximaler Strom 80 A
- 10 Kanäle maximaler Strom 500 A
- 6 Temperaturkammern mit CO<sub>2</sub> Löschanlage
- Prüftemperatur -40 bis + 180 °C

- Lade/Entladestrom : 0,02 – 20 A
- Genauigkeit: 0,2 %
- Messrate U und I:  $\leq 100$  ms
- Steuerung über einen Leitrechner
- Speicherung aller Daten in einer Datenbank
- Bedienung über grafische Benutzeroberfläche
- Menüführung mit Windows Konvention
- Multiuser Betrieb
- Modularer Aufbau in 19 " Schränken
- Temperaturmessung für jeden Kanal

### **Maschinenausführung**

- mikroprozessorgesteuerter Konstanter Fa.Digatron
- Temperaturkammer Fa.Vötsch

### **2.2.2.9 AP 2.1.10 – Erstellung Lastenheft Trockenraumerweiterung**

Die wichtigsten Punkte des Lastenheftes für die Erweiterung des Trockenraumes (Abbildung 19) sind nachfolgend zusammengefasst:

- Trockenraum mit Reinraumbedingung
- Trockenraum mit integriertem Kran
- Reinraumklasse ISO 8 mit einer Filtereinheit F9
- Umgebungstemperatur Winter 18 °C; Sommer 32 °C
- Ausgelegt für 2 Personen und 10 kW Maschinenleistung
- Taupunkt – 50 °C (max 2 % r.F. 22 °C  $\pm$  2 K )
- Raumdruck von 20 - 130 Pascal
- Krananlage mit einer Hebelast von 10 Tonnen
- CE-Kennzeichnung
- Anlagenausführung: Gemäß Angebot
- Systemraum mit Decke (L x B x H) 15,24 m x 5,65 m x 5,6 m
- Vollwand 45 mm dick aus doppelseitigem Stahlblech, mit Mineralwolle gefüllt und Oberfläche pulverbeschichtet.
- Beleuchtungsstärke 1.000 Lux, Lichtfarbe 840
- Dampfdiffusionsdichter Bodenbelag mit Wasserdampfdiffusionsäquivalente sd-Wert > 1500 m, Baustoffklasse B2
- Trockenraum mit Personen- und Materialschleuse
- Umlaufende Wände und Türen mit Fenster
- Trockenraum wird in Halle 15.1 aufgestellt

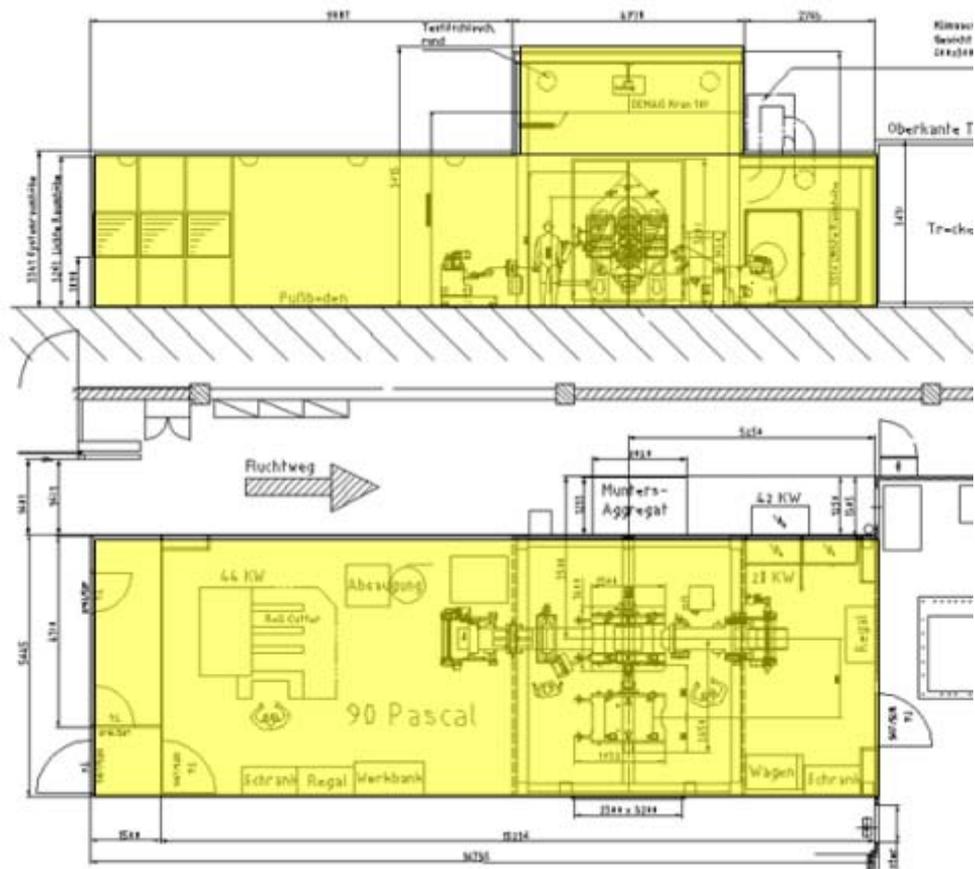


Abbildung 19: Layout Trockenraum mit Rollenschiere und Kalander.

### 2.2.3 AP 2.2 - Konzeption des Zellmusterbaus für 30-40 Ah-Zellen

Dauer: 01.07.2010 bis 31.12.2010

#### 2.2.3.1 AP 2.2.1 - Konzeption des Zellmusterbaus für Rundzellen

Dauer: 01.07.2010 bis 31.12.2010

Auf Basis der parametrisierten Fertigungsmethodik und Anlagen wurden die Prozesse und Arbeitsschritte spezifiziert und die Mitarbeiter organisatorisch zu den einzelnen Arbeitsschritten zugeteilt.

Die Anlagen und die Arbeitsschritte für den Zellmusterbau 30-40 Ah Zellen wurden so ausgelegt, dass mit relativ geringen Umrüstzeiten sowohl runde als auch prismatische Zellen auf den gleichen Anlagen gebaut werden können. Durch den modularen Aufbau werden die Kosten für die Forschungsanlagen reduziert und die Mitarbeiter können sehr effizient eingesetzt werden. Übergeordnet ergeben sich folgende Prozessketten für die Herstellung von:

- Anode
- Kathode
- Halbtteile
- Zellaasemblierung
- Formation und elektrische Prüfung
- Lagern

### 2.2.3.2 AP 2.2.2 - Konzeption des Musterbaus für prismatische Zellen

Dauer: 01.07.2010 bis 31.12.2010

Die Anlagentechnik und die Arbeitsschritte für den Zellmusterbau 30-40 Ah Zellen wurden so ausgelegt, dass mit den flexibel aufgebauten Forschungsanlagen sowohl runde als auch prismatische Zellen gebaut werden können. Die Konzeption des Zellmusterbaus entspricht dem AP 2.2.1.

### 2.2.4 AP 2.3 - Identifikation geeigneter Lieferanten und ggf. Zweitlieferanten für Anlagentechnik und Komponenten

Die Arbeiten zu diesem AP konnten fristgerecht bis zum 30.06.2011 abgeschlossen werden. Soweit wie möglich wurden mit deutschen Lieferanten Kooperationen gebildet, um die Technologie in Deutschland zu etablieren.

Zu den Kriterien für die Herstellerauswahl zählten die folgenden Punkte:

- Weltmarktposition unter den vorderen Plätzen
- Bereitschaft zur Zusammenarbeit und zur anwendungstechnischen Unterstützung der VW-VM
- Bereitschaft zur Kooperation mit anderen Herstellern (z. B. Kooperation von Coater Hersteller mit Düsen Hersteller).
- Bereitschaft, maßgeschneiderte Lösungen für die Bedürfnisse des Kunden anzubieten.
- Erfahrung im Bau von Anlagen für die Herstellung und Tests von Lithium-Ionen-Zellen.
- Hohe Innovationsbereitschaft
- Fähigkeit der Skalierung der Anlagen für eine spätere Massenfertigung
- Deutschen Unternehmen wurde der Vorrang gegeben, wenn:
  - a. deren Anlagen mindestens gleichwertig zu denen ausländischer Wettbewerber sind,
  - b. sie innovative Forschungs- und Entwicklungsansätze verfolgen und bereit sind Entwicklungspartnerschaften zu bilden,
  - c. ein gutes Preis-Leistungs-Verhältnis nachweisbar war,
  - d. die räumliche Nähe in Deutschland gegeben war, um im Servicefall und bei Maschinenänderungen die Kosten gering halten zu können und Ausfallzeiten zu reduzieren.

### 2.2.5 AP 2.4 - Aufbau und Inbetriebnahme Versuchsanlagen

Dauer: 01.10.2010 bis 31.12.2011

Das Unterarbeitspaket 2.4.12 (Aufbau und Inbetriebnahme Trockenraumerweiterung) wurde nachträglich ergänzt. Die Arbeitspakete, siehe Zusammenfassung in der nachfolgenden Tabelle 6, wurden zum 31.12.2011 erfolgreich und fristgerecht abgeschlossen. Der Meilenstein MS3 wurde damit erreicht.

AP-Nr.	Arbeitspakete (AP)	Startdatum	Enddatum	Bemerkungen
2.4.1	Aufbau und Inbetriebnahme Trockenmischer	01.10.2010	31.12.2011	Ein Trockenmischer wurde nicht beschafft. Durch die Nass-Mischtechnologie (vgl. AP 2.4.3) ist es gelungen den Trocken- und Nassprozess mit nur einem Mischer durchzuführen. Die Vorteile sind: - weniger Umweltbelastung durch Stäube - kürzere Prozesszeiten - geringerer Platzbedarf
2.4.2	Aufbau und Inbetriebnahme Maschinentchnik zur Herstellung von Si/C-Komposit	01.10.2010	31.12.2011	

AP-Nr.	Arbeitspakete (AP)	Startdatum	Enddatum	Bemerkungen
2.4.3	Aufbau und Inbetriebnahme Nassmischer	01.10.2010	31.12.2011	Gemäß Förderantrag war geplant, die vorhandenen Vakuum-Nassmischer für NEP- und wässrige Pasten umzubauen. Die Vorversuche hatten jedoch gezeigt, dass die Pastenqualität für automobiler Anforderungen nicht ausreicht. Deutlich bessere Ergebnisse wurden mit kleinen Labor-Doppelplanetenmischern erzielt. Aufbauend auf diesen Erfahrungen, konnte eine noch bessere Pastenqualität mit Laborversuchen mit Mixern der Knettechnik erreicht werden. Mit dem patentierten Verfahren konnte auch auf die Beschaffung eines Trockenmischers verzichtet werden. Der Antrag zur Beschaffung von zwei 50 l Mixern wurde am 03.05.11 durch das PTJ genehmigt. Die vorhandenen Vakuum-Nassmischer werden weiterhin für die Herstellung der Binderlösung eingesetzt. Die Prozesse werden im Projekt weiter erforscht u.a. in Bezug auf Pastenfiltration, Fördertechnik und Anbindung an den Forschungsbeschichter.
2.4.4	Aufbau und Inbetriebnahme Beschichtungs-Anlage Elektroden	01.10.2010	31.12.2011	In enger Kooperation ist es gelungen, eine Forschungsanlage aufzubauen, mit der die Prozessqualitäten des Weltmarktführers erreicht werden konnten. Hauptproblem ist noch die intermittierende Beschichtung, welche weiter intensiv erforscht und verbessert wird. Dazu wurden bereits sehr gute Ansätze erarbeitet und von VWVM ein neuartiges Verfahren zur Düsensteuerung zum Patent angemeldet.
2.4.5	Aufbau und Inbetriebnahme Kalanders	01.10.2010	31.12.2011	Aufbau und Inbetriebnahme verlief ohne größere Probleme. Nachbesserungen erfolgen noch im Bereich der Laser-Schichtdickenmessung.  Um Elektroden mit nicht beschichteter Randzone noch höher verdichten zu können, wurde eine Erfindung angemeldet, mit welchem durch Vorverformungen Verwerfungen vermieden werden können.
2.4.6	Aufbau und Inbetriebnahme Wickelautomat	01.10.2010	31.12.2011	Der Forschungswickelautomat ist neuartig in seiner Konzeption. Das kombinierte Verfahren mit 2 - 8 Lasern zum progressiven Schneiden von Ableitern und Separatoren, sowie der rechnergesteuerten Wicklung wurde zum Patent angemeldet. Dadurch konnte ein erheblicher Wettbewerbsvorteil in Bezug auf höhere Volumenausnutzung erreicht werden.
2.4.7	Aufbau und Inbetriebnahme Schweißanlage für Ableiter	01.10.2010	31.12.2011	

AP-Nr.	Arbeitspakete (AP)	Startdatum	Enddatum	Bemerkungen
2.4.8	Aufbau und Inbetriebnahme LASER (Schweißen Deckel/Becher)	01.10.2010	31.12.2011	
2.4.9	Aufbau und Inbetriebnahme Elektrolytbefüllungs-Anlage	01.10.2010	31.12.2011	
2.4.10	Aufbau und Inbetriebnahme Formationsanlage	01.10.2010	31.12.2011	
2.4.11	Aufbau und Inbetriebnahme Prüffeld	01.10.2010	31.12.2011	
2.4.12 (Nachantrag)	Aufbau und Inbetriebnahme Trockenraumerweiterung	01.11.2011	31.12.2011	
2.4.13	Modifizierung Rollenschere	01.10.2010	30.06.2011	Im Zwischenbericht Zeitraum 01.01.-30.06.2011 wurden noch verschiedene Maßnahmen zur Verbesserung der Schnittgüte aufgeführt. Als kostengünstige Maßnahme wird jedoch weiter der wöchentlich Messerwechsel durchgeführt.
2.4.14 (Nachantrag)	Aufbau und Inbetriebnahme einer Ultraschallschweißanlage			Dem Antrag zur Beschaffung einer US-Schweißanlage wurde vom PtJ mit Schreiben vom 19.09.2011 zugestimmt. Die Anlage wurde jedoch bisher nicht beschafft, da es gelungen ist, mittels der vorhandenen Laseranlage die Ableiterfahnen besonders kurz an die Polbleche zu schweißen. Soweit bekannt, schweißen alle Wettbewerber mit US-Schweißanlagen. Nachteilig dabei ist jedoch, dass die Sonotroden mit min. ca. 5 mm, relativ dick ausgeführt werden müssen. Durch den hier erforschten Anbindungsprozess mittels Laser, konnte die Volumenausnutzung um 2-3% verbessert werden.

Tabelle 6: Zusammenfassung AP 2.4.1 – 2.4.14

Details zu den einzelnen Arbeitspaketen können den folgenden Kapiteln entnommen werden.

### 2.2.5.1 AP 2.4.1 - Aufbau und Inbetriebnahme Trockenmischer

Dauer: 01.10.2010 bis 31.12.2011

Das Trockenbeschichten (Coatieren) von Anoden- und Kathodenmaterialien konnte eindeutig in Frage gestellt werden. Durch Wiederholungsversuche konnte gezeigt werden, dass die Beschaffung einer Maschine zum Trockenbeschichten nicht notwendig ist. Das Trockenmischen im Sinne eines trockenen Vorvermischens aller Pastenbestandteile ist hingegen ein sehr wichtiger Prozessschritt als optimale Ausgangslage für den Nassmischschritt. Für diesen Prozessschritt wird aber keine zusätzliche Maschine benötigt, wenn in die neue Nassmischtechnik investiert wird. Vorversuche

haben den effektiven Einsatz des Nassmischers für Trockenmischungen demonstriert. Dazu wurden Versuche im Technikum des Herstellers durchgeführt und dokumentiert. In Abbildung 20 wird der Versuch mit einem Blick in die Mischtrommel dargestellt. Das Ergebnis überzeugte von der Einsatzfähigkeit dieses Nassmischers zum Trockenvormischen aller Pastenbestandteile.



Abbildung 20: Trockenmischen aller Pastenbestandteile

#### 2.2.5.2 AP 2.4.2 - Aufbau und Inbetriebnahme Maschinentechnik zur Herstellung von SiC-Komposit

Dauer: 01.10.2010 bis 31.12.2011

Der wichtigste Prozessschritt zur Herstellung des Si/C-Komposits ist die Zerkleinerung bzw. Desagglomeration des Siliziumausgangsmaterials zu einzelnen Nanopartikeln sowie deren homogene Verteilung/Dispersion. Dieses wird, wie im Arbeitspaket 2.1.2 beschrieben, mit einer Rührwerkskugelmühle erreicht.



Abbildung 21: Rührwerkskugelmühle mit Datenaufzeichnung, Anschlussleitungen vom Vorlagebehälter, Umwälzpumpe und Kühlsystem

Diese Maschine wurde nach dem vorgegebenen Lastenheft bestellt und im Dezember 2010 geliefert. Sie befindet sich in betriebsbereitem Zustand wie es Abbildung 21 zeigt. Die Mühle benötigt zum Betrieb einen 400 V-Drehstromanschluss, Kühlwasser und Druckluft, was bei der Standortwahl berücksichtigt wurde. Bislang nicht vorhandene Medien wurden zusätzlich installiert.

### **2.2.5.3 AP 2.4.3 - Aufbau und Inbetriebnahme Nassmischer**

Dauer: 01.10.2010 bis 31.12.2011

#### **a) Vorabnahme beim Lieferanten**

Die Vorabnahme wurde beim Lieferanten im Zeitraum vom 01.11. – 03.11.11 durchgeführt. Ziel der Abnahme war es, alle Sicherheitseinrichtungen, alle im Lastenheft deklarierte Funktionen und die Qualität der gemischten Pasten zu begutachten und bei negativem Befund die Nacharbeit vor Ort zu ermöglichen. Die Vorabnahme erfolgt reibungslos, da alle relevanten Funktionen und Sicherheitseinrichtungen ohne Beanstandungen nachgewiesen konnten. Die Freigabe zum Versand konnte damit erteilt werden.

#### **b) Anlieferung, Aufbau und Anschluss**

Die Anlieferung erfolgte im Dezember 2011. Anhand der Überprüfung der Ladeliste konnte die Vollständigkeit der Lieferung bestätigt werden. Neben der Ladeliste waren die Prüfprotokolle der Präzisionsteile (Mischbehälter und Schaufeln) ein wesentlicher Bestandteil der Lieferung. Der Aufbau der Maschinen konnte durch internes Personal vorgenommen werden.

#### **c) Erstinbetriebnahme**

Die Erstinbetriebnahme der beiden Mischer wurde zusammen mit einem Montagearbeiter und einem Verfahreningenieur des Herstellers vorgenommen. Wie auch bei der Vorabnahme war es Ziel, alle Sicherheitseinrichtungen, alle im Lastenheft deklarierte Funktionen und die Qualität der gemischten Pasten zu begutachten.

Die Erstinbetriebnahme erfolgt ohne Probleme. Die zugesicherte Qualität aller Pasten konnte nachgewiesen werden. Negative Skalierungseffekte zum kleineren Leihmischer sind nicht aufgetreten.

#### **d) Endabnahme der Anlage**

Die Maschinen wurden CE-zertifiziert bestellt und sind so geliefert worden. Damit erfolgte eine problemlose Endabnahme in Ellwangen. Die Mischer entsprechen den europäischen Normen in Bezug auf Arbeitssicherheit, Brandschutz, elektrischer Sicherheit und Umweltschutz. Eine zusätzliche Prüfung durch einen Ingenieur vom TÜV war in diesem Fall nicht notwendig.

Die Beschaffung von 2 Nassmischern ist im Rahmen dieses Arbeitspaketes fristgerecht erfolgt. Die endgültige interne Freigabe erfolgte am 20.01.2012.

### **2.2.5.4 AP 2.4.4 - Aufbau und Inbetriebnahme Beschichtungsanlage Elektroden**

Dauer: 01.10.2010 bis 31.12.2011

#### **a) Vorabnahme beim Lieferanten**

Die Vorabnahme wurde beim Lieferanten am 27.12. und 28.12.2010 durchgeführt. Als Ergebnis wurden einvernehmlich Änderungen bezüglich der Einhausung am Abwickler, zur Absaugung in der Einhausung am Auftragswerk und bei der Lagerung der Walzen getroffen. Besonders die beidseitige Lagerung aller Leitwalzen und die Reitstocklagerung des Auf- und Abwicklers waren entscheidende Änderungswünsche.

#### **b) Anlieferung, Aufbau und Anschluss**

Die Anlieferung der Anlage erfolgte am 10.01.2011 in Ellwangen. Anhand der Überprüfung der Ladeliste konnte die Vollständigkeit der Lieferung bestätigt werden. Neben der Ladeliste waren die Prüfprotokolle aller Präzisionsteile (Walze, Düse, ... ) ein wesentlicher Bestandteil der Lieferung.

#### **c) Erstinbetriebnahme**

Ein erster Probelauf zur Nassbeschichtung wurde am 22.02.2011 erfolgreich durchgeführt. Das Ergebnis war, dass Düse und Auftragswalze einsatzbereit sind. Es wurde eine vollflächige Beschichtung mit 190 g/m<sup>2</sup> durchgeführt.

Es wurde Änderungsbedarf bezüglich der Beschichtungsdüse festgestellt. Weiterhin ist die Gegendruckwalze während des Beschichtungsbetriebes nicht in der geforderten Genauigkeit einstellbar. Installation der Reitstockgegenlagerung am Auf-Abwickler wurde durchgeführt. Beim

Beschichtungsbetrieb ist Faltenbildung aufgetreten. Daher musste eine exakte Ausrichtung aller Walzen notwendigerweise erfolgen.

Softwareanpassungen mussten zur Einhaltung der Teilungsgenauigkeit bei Intermittierung und zur Einhaltung der Toleranzen der ersten zur zweiten Beschichtung durchgeführt werden.

#### **d) Abnahmen TÜV, Arbeitssicherheit, Brandschutz und elektrische Sicherheit**

Die TÜV-Abnahme für Aufnahme des Forschungsversuchsbetriebes wurde am 18.02.2011 erfolgreich durchgeführt. Die Freigabe für den Betrieb wurde noch am selben Tag mündlich erteilt. Gegenstand der Prüfung waren sicherheitstechnische Aspekte der Maschine und deren Einbindung in die Sicherheitsarchitektur der Gebäudeleittechnik.

Am 23.03.2011 erfolgte der Gefahrenübergang der Maschine auf die Mitarbeiter von VW-VM. Die Maschine konnte von diesem Tag an ohne das Beisein der Mitarbeiter des Herstellers betrieben werden.

Die endgültige Freigabe durch eine zweite TÜV-Abnahme zur Maschinenfreigabe erfolgte am 06.05.2011. Dies war nötig, da die sicherheitsrelevanten Bauteile umgebaut wurden.

#### **e) Endabnahme der Anlage**

Die Beschichtungsanlage wurde erfolgreich abgenommen und befindet sich seit Februar im Forschungsversuchsbetrieb. Die Arbeiten zu diesem Arbeitspaket wurden daher fristgerecht abgeschlossen.

Der Betrieb des Beschichters bildet zusammen mit der Pastenlogistik eine untrennbare Einheit. Da der Beschichter bereits zu Beginn des 1. Halbjahres 2011 in Betrieb genommen wurde, konnte schwerpunktmäßig im zweiten Halbjahr 2011 die Aufbereitung und Zuführung der Paste zum Beschichter bearbeitet werden. Die Filtration wurde bisher über einen manuellen Prozess mit Hilfe eines Metallnetzes realisiert. Dieser Prozess ist für einen kontinuierlichen Forschungsversuchsbetrieb nicht praktikabel und entspricht nicht dauerhaft den Arbeitsschutzvorschriften. Aus diesem Grund wurden Versuche mit Leihgeräten des Filterherstellers durchgeführt, wie in Abbildung 22 dargestellt.



Abbildung 22: Versuchsaufbau zur Pastenfiltration

#### **2.2.5.5 AP 2.4.5 - Aufbau und Inbetriebnahme Kalanders**

Dauer: 01.10.2010 bis 31.12.2011

##### **Vorabnahme beim Lieferanten**

Die Vorabnahme beim Lieferanten fand am 10.05. und 11.05.2011 statt. Dabei wurden folgende noch zu erledigende Abschlussarbeiten besprochen:

- Änderungen bezüglich zwei weiterer Start-Stopp-Taster, Maßband zum Kerneinrichten.
- Absicherung der Walzen durch max. Eingabe von 1369 N/mm,
- Splice-Erkennung für rotes und weißes Klebeband, Schutz am Rakel anbringen.

### **Anlieferung, Aufbau und Anschluss**

Anlieferung der Anlage erfolgte am 24.05.2011. Abladen, Überprüfen der Ladeliste, Anlage in Trockenraum einbringen und aufbauen. Wegen des hohen Gewichts des Walzenstuhls von ca. 7-8 t musste ein Spezial-Stapler-Fahrzeug eingesetzt werden.

### **Erstinbetriebnahme**

- Probelauf und Inbetriebnahme erfolgte am 30.05.2011 mit 1.920 m Anodenband und 680 m Kathodenband ohne Probleme. Für die exakte Laserschichtdicken-Messung soll noch eine Stützwalze nachgerüstet werden.
- Die Abnahme für Arbeitssicherheit, Brandschutz und elektrische Sicherheit erfolgte am 31.05.2011 mit den Sicherheitsverantwortlichen des Werkes VARTA Microbattery.

### **Endabnahme**

Der Kalender wurde am 31.05.2011 mit Unterzeichnung der Abnahmedokumente erfolgreich abgenommen und für den Betrieb freigegeben. Die Arbeiten zu diesem Arbeitspaket wurden daher fristgerecht abgeschlossen.

### **2.2.5.6 AP 2.4.6 - Aufbau und Inbetriebnahme Wickelautomat**

Dauer: 01.10.2010 bis 31.12.2011

#### **Vorabnahme beim Lieferanten**

Die Vorabnahme der Anlage fand Anfang 2011 beim Lieferanten statt. Nach dem Abbau der Anlage wurde diese Ende Oktober im Trockenraum in Ellwangen installiert und Anfang November in Betrieb genommen. Auf der Anlage werden, aus vorab mittels Rollenschere auf Breite geschnittenen Elektrodenbändern, mittels Laserstrahl Ableiterfahnen in einem vorberechneten Muster ausgeschnitten. Diese mittels Laser geschnittenen Elektrodenbänder werden über mehrere Umlenkrollen und Ausrichtstationen deckungsgleich in der Wickelstation zu einem Zellwickel gewickelt.

Mit der Wickelmaschine können sowohl prismatische als auch runde Wickel für 30 Ah und 60 Ah Zellen hergestellt werden. Basis für Geometrieauslegung der prismatischen Wickel ist ein DIN-Entwurf 1252 – „Elektrische Straßenfahrzeuge – Batteriesysteme – Abmessungen für Lithium-Ionen Zellen“.

- 30 Ah prismatische Zellen PHEV 2-Format: H: 91 mm, W: 148 mm, T: 26,5 mm
- 60 Ah prismatische Zellen BEV1-Format: H: 115 mm, W: 173 mm, T: 32 mm

### **Anlieferung Aufbau und Anschluss**

Anlieferung und Aufbau im Trockenraum erfolgte am 20.10.2011 Anschluss: 400 Volt, Druckluft 6 bar.

### **Inbetriebnahme**

Die Anlage wurde von KW 43 bis KW 45 von 2 Technikern des Lieferanten, einem Elektrotechniker von VOLKSWAGEN VARTA Microbattery sowie einem Maschinenfahrer von VOLKSWAGEN VARTA Microbattery in Betrieb genommen.

### **Maschinefreigabe**

Die Maschinefreigabe ist am 24. Oktober 2011 erfolgt.

### **Endabnahme**

Die Endabnahme erfolgt im Januar 2012 nachdem die Anlage vollständig eingefahren ist.



Abbildung 23: Entstehung eines 30-Ah-Rundwickels auf Aluminiumdorn

### **2.2.5.7 AP 2.4.7 - Aufbau und Inbetriebnahme Schweißanlage für Ableiter**

Dauer: 01.10.2010 bis 31.12.2011

Die Ultraschall-Schweißanlagen wurden nur noch zum Bau von runden Laborzellen im Format 18650 verwendet. Das AP wurde bereits zum 30.06.2011 abgeschlossen.

Bei den Schweißversuchen großformatiger prismatischen Zellen, ergaben sich Vorteile für die Laserschweißung im Vergleich zur Ultraschallschweißung; siehe auch Tabelle 6. Beim Laserschweißen war nachweislich eine höhere Zellkapazität erzielbar.

### **2.2.5.8 AP 2.4.8 - Aufbau und Inbetriebnahme LASER (Schweißen Deckel / Becher)**

Dauer: 01.10.2010 bis 31.12.2011

Der Laser (Abbildung 24) wurde gemäß Bestellung und Lastenheft planmäßig mit Unterstützung der Fa. VARTA Microbattery und ortsnaher Handwerksfachbetriebe im Trockenraum aufgebaut und im Dezember 2010 in Betrieb genommen und freigegeben.

3 Mitarbeiter haben eine Bediener- und Programmierschulung beim Hersteller absolviert. Ein Mitarbeiter wurde als Laser-Schutzbeauftragter geschult und gemeldet.



Abbildung 24: Blick in das Bearbeitungszentrum des Lasers

### **Vorabnahme beim Lieferanten**

Vorabnahme und Schulung von 2 Mitarbeitern fand in KW49/ bis KW50/2010 Lieferanten statt. Die Anlage hatte keine Mängel und entsprach dem Lastenheft.

### **Anlieferung, Aufbau und Anschluss**

Anlieferung und Aufbau der Anlage mit Filter im Trockenraum erfolgte ab dem 29.11.2010. Anschluss: 400 Volt, Druckluft 6 bar, Stickstoff.

### **Erstinbetriebnahme**

Die Inbetriebnahme erfolgte in der Zeit vom 07.12. bis 12.12.2010. Ergebnis: Keine Mängel.

### **Abnahmen TÜV, Arbeitssicherheit, Brandschutz und elektrische Sicherheit**

Nach weiteren Probeläufen erfolgten sicherheitstechnische Abnahmen. Da die Laseranlage in einem Trockenraum mit weitgehend geschlossener Umluft betrieben wird, mussten besondere Auflagen in Bezug auf Sicherheit und Brandschutz, sowie der Feinstaub-Filterung und der automatischen Überwachung der Anreicherung der Luft durch die verwendeten Schutzgase (Stickstoff und Argon) erfüllt werden.

### **Endabnahme**

Die Laserschweißanlage wurde erfolgreich abgenommen. Die Arbeiten zu diesem Arbeitspaket wurden daher fristgerecht abgeschlossen.

## **2.2.5.9 AP 2.4.9 - Aufbau und Inbetriebnahme Elektrolytbefüllungsanlage**

Dauer: 01.10.2010 bis 31.12.2011

Die Arbeiten wurden fristgerecht erfolgreich abgeschlossen. Die wichtigsten Phasen dazu sind nachfolgend zusammengefasst.

### **Vorabnahme beim Lieferanten**

Die mechanische Vorabnahme fand vom 7. Juli bis 9. Juli 2011 beim Lieferanten statt. Die Anlage hatte keine Mängel und entsprach dem Lastenheft.

### **Anlieferung, Aufbau und Anschluss**

Anlieferung und Aufbau der Anlagen erfolgte Anfang August 2011 im Trockenraum. Anschluss: 400 Volt, Druckluft, Argon, Vakuum.

### **Erstinbetriebnahme und Schulung**

Die Inbetriebnahme und Schulung von 2 Mitarbeitern erfolgte zwischen 12.9. und 21.9.2011 durch einen Techniker Lieferanten. Ergebnis: Kleinere Modifikationen waren an den Vorrichtungen nötig. Die Modifikationen wurden im Anschluss an die Inbetriebnahme erledigt.

### **Abnahmen, Arbeitssicherheit, Brandschutz und elektrische Sicherheit**

Die Anlagen wurden von den Sicherheitsbeauftragten seitens Arbeitssicherheit, Brandschutz und elektrische Sicherheit geprüft und abgenommen.

### **Endabnahme**

Die Elektrolytfüllanlagen wurden im Trockenraum bei VW-VM erfolgreich abgenommen. Die Arbeiten wurden daher fristgerecht abgeschlossen.

## **2.2.5.10 AP 2.4.10 - Aufbau und Inbetriebnahme Formationsanlage**

Dauer: 01.10.2010 bis 31.12.2011

Die Formation besteht aus folgenden Einzelkomponenten:

- Regalbediengerät
- Konstanter
- Verkabelung
- Profillager
- Klimaanlage
- Brandmeldeanlage

Nach erfolgreicher Abnahme der Einzelkomponenten wurde die Formation abgenommen. Die Arbeiten zu diesem Arbeitspaket wurden daher erfolgreich und fristgerecht abgeschlossen.

#### **2.2.5.11 AP 2.4.11 - Aufbau und Inbetriebnahme Prüffeld**

Dauer: 01.10.2010 bis 31.12.2011

Das Prüffeld besteht aus folgenden Einzelkomponenten:

- Thermoschränke
- Konstanter
- Verkabelung
- Klimaanlage
- Brandmeldeanlage

Nach erfolgreicher Abnahme der Einzelkomponenten wurde das Prüffeld abgenommen. Die Arbeiten zu diesem Arbeitspaket wurden daher erfolgreich und fristgerecht abgeschlossen.

#### **2.2.5.12 AP 2.4.12 - Aufbau und Inbetriebnahme Trockenraumerweiterung**

Dauer: 01.10.2010 bis 31.12.2011

##### **Anlieferung, Aufbau und Anschluss**

Anlieferung und Beginn des Aufbaus des Trockenraums in Halle 15.1 bei VWVM erfolgte ab dem 07.03.2011. Montiert werden mussten Trockenraumboden, Wände, Decken, Türen, Schleusen und Fenster sowie die komplette, vollautomatische Klimatisierungstechnik (Abbildung 25). Für den ca. 15 t schweren Kalanders musste die Traglast des Bodens mittel 5 cm starker Stahlplatten verstärkt werden. Abbildung 25 zeigt die im Fundament eingegossenen Stahlplatten.

Für die Montage und Wartung des ca. 7 t schweren Walzenstuhls, wurde ein 10 t Kran mit in den Trockenraum integriert. Die umfangreiche Lüftungs- und Klimatechnik wurde installiert und über Software an die VWVM Spezifikation angepasst (Abbildung 26).

##### **Erstinbetriebnahme sowie die Abnahmen für Arbeitssicherheit, Brandschutz und elektrische Sicherheit.**

Die Freigabe der Anlage erfolgte nach Begutachtung durch den TÜV, den sicherheitstechnischen Fachkräften und der Werksfeuerwehr der VARTA Microbattery am 08.04.2011.



Abbildung 25: Vollständig aufgebauter Trockenraum. Am Boden erkennt man die im Boden eingelassenen Stahlplatten zur Erhöhung der Traglast von Kalanders und Kran



Abbildung 26: Teil der Klimatisierungstechnik



Abbildung 27: Trockenraumerweiterung nach Inbetriebnahme

### **2.2.5.13 AP 2.4.13 – Modifizierung Rollenschere**

Dauer: 01.01.2011 bis 30.06.2011

#### **Verlagerung der Rollenschere**

Die Verlagerung der Rollenschneidmaschine in den Trockenraum erfolgte fristgerecht.

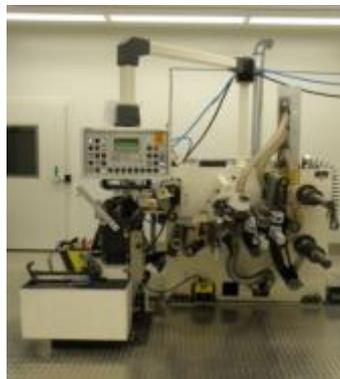


Abbildung 28: Rollenschere im Trockenraum.

### Zielgrößen der Optimierung

- Die Breite des Schneidgrates einer nicht beschichteten Metallfolie muss  $< 10\%$  der Gesamtdicke einer nicht beschichteten Metallfolie betragen.
- Ebenso muss die Länge der Materialausbrüche und Materialabbrüche an den Schnittkanten der beschichteten Metallfolie  $> 10\%$  der Gesamtdicke sein.
- Es dürfen keine Metallfitter aus Aluminium oder Kupfer auf der Oberfläche der beschichteten Metallfolie bei 10-facher optischer Vergrößerung nachweisbar sein.
- Keine Bildung von fadenförmigen Abquetschungen an den Separatoren.

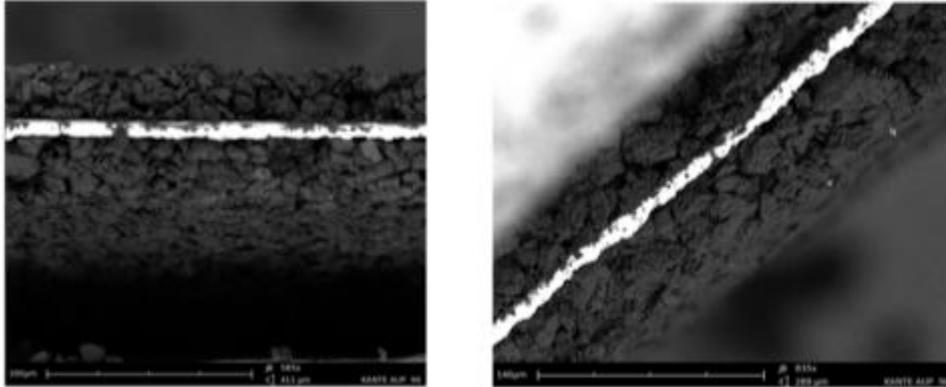


Abbildung 29: Geschnittene Elektrode ohne Schnittgrat am Al- oder Cu-Kollektor

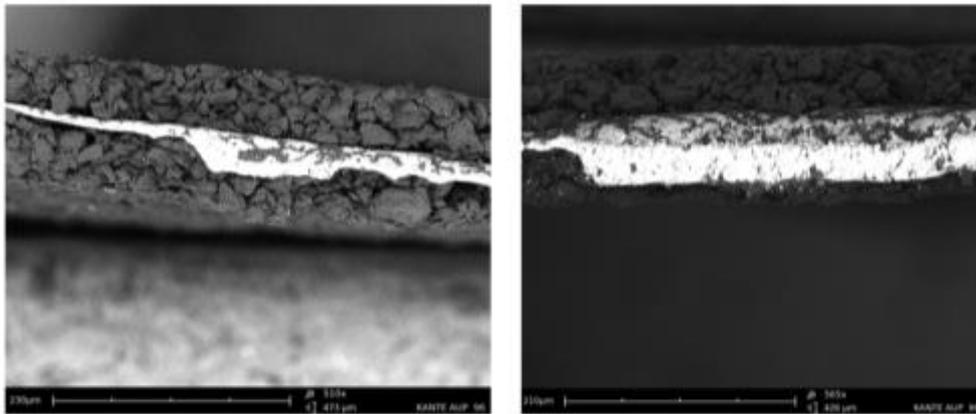


Abbildung 30: Geschnittene Elektrode mit Schnittgrat und Materialabbrüchen

Die Schnittgüte wird durch wöchentlichen Messerwechsel sichergestellt. Andere, zum Teil erprobte und diskutierte Alternativen sind:

- Erhöhung der Standzeit des Messers durch hartmetallische oder vollkeramische Messer
- Erprobung von verschiedenen Schnittwinkeln.  $60^\circ$  Schnittwinkel wurde eingeführt.
- Installation einer Reinigung (Bürsten) und Absaugung der Elektrodenoberflächen.
- Umrüstung der kompletten Rollenschere durch den Hersteller.

Alle obigen Maßnahmen wurden umgesetzt und haben einen messbaren Erfolg gebracht.

### 2.2.6 AP 2.4.14 – Aufbau und Inbetriebnahme Bandtrockner

Dauer: 01.02.2013 bis 31.09.2013

Es wurden Untersuchungen für ein alternatives Trocknungsverfahren auf Basis von Infrarotstrahlung als Alternative zur klassischen Vakuumtrocknung von Elektrodenmaterialien für Lithium-Ionen-Zellen durchgeführt. Hierzu stellte der Hersteller kostenfrei einen Bandtrockner (Abbildung 31) nach Vorgabe Lastenheft VW-VM für Untersuchungen zur Verfügung.

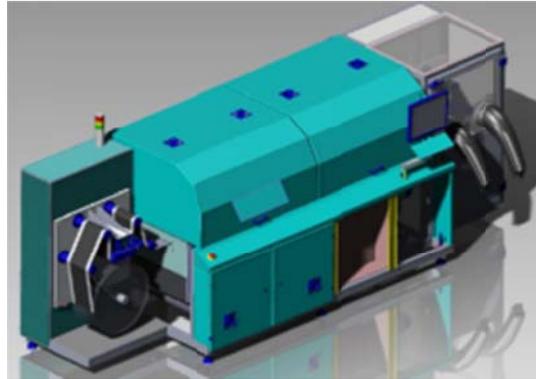


Abbildung 31: Nach VW-VM-Vorgabe konzipierter Durchlauftrockner

Wesentliche Anforderungen im erstellten Lastenheft waren:

- Reduzierung der Trockenzeit von Elektrodenfolie
- eventuelle Verkettung im späteren Serienprozess

#### Herausforderungen

- Kontrollierte Steuerung der Leistung und Regelung der Temperatur der IR- Strahler
- Konstante Oberflächentemperatur der Elektrodenbahn
- Abhängigkeit der Strahlertemperatur auf die Materialtemperatur
- Restwassergehalt < 200 ppm für Anoden- und Kathodenband
- Bahnware gerichtet ab- und aufzuwickeln ohne Beschädigung der Elektrodenoberfläche

#### Geplante Untersuchungen

- Einfluss Strahlerabstand auf den Wassergehalt
- Einfluss der Temperatur des Konvektionsmediums auf den Wassergehalt
- Einfluss des Konvektionsmediums auf den Wassergehalt (Stickstoff vs. Trockenluft)
- Ermittlung max. Bandgeschwindigkeit
- Zellbau mit getrockneten Bändern
- Einfluss der Partikelgröße der Aktivmaterialien auf das Trockenergebnis
- Einfluss des Volumenstroms im Trockner

Die geplanten Untersuchungen wurden fristgerecht beendet. Ein Nutzen der Bandtrocknung konnte zum Projektende nicht gefunden werden.

### 2.2.7 AP 2.5 - Einfahren der Versuchsanlagen

Dauer: 01.01.2011 bis 31.03.2012

Die Hauptarbeiten zu diesem Arbeitspaket erfolgten im Berichtszeitraum vom 01.01.2012 – 31.03.2012.

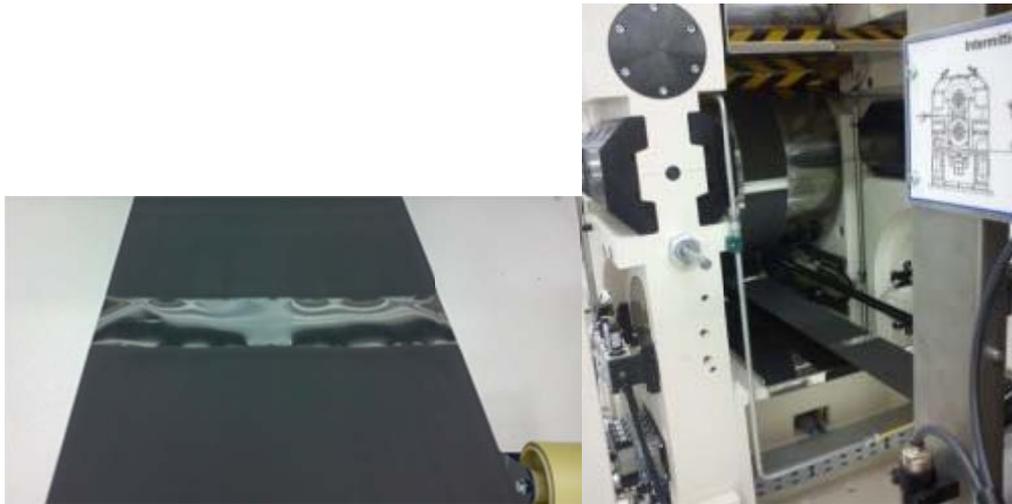


Abbildung 32: Intermittierende Beschichtung: Ausschnitt Elektrodenband (links) und Verdichtungsprozess im Kalandrierwerk (rechts)

#### **Einfahren der Wickelmaschine und Kalandrierwerk für intermittierende Beschichtung**

- Elektrodenbänder mit intermittierender Beschichtung auf neuen Beschichtern hergestellt und kalandriert
- Beschichtungsqualität ist hinreichend
- Qualität Kalandrierung ist in Ordnung, maximale Verdichtung für NMC noch nicht erreicht

#### **Einfahren Beschichtungsanlage für intermittierende Beschichtung**

Die Beschichtungsanlage wurde unter anderem für die Herstellung von intermittierten Elektroden beschafft. Die Herausforderungen, die im Zusammenhang mit dem Einfahren der Anlage bewältigt werden mussten, waren erheblich, da die Start- und Abrisskantengeometrie nicht im geforderten Toleranzbereich lagen. Die Start- und Endkanten waren überhöht, wie in Abbildung 33 dargestellt. Eine derartige Elektrode konnte in den Folgeprozessen nicht weiter verarbeitet werden.

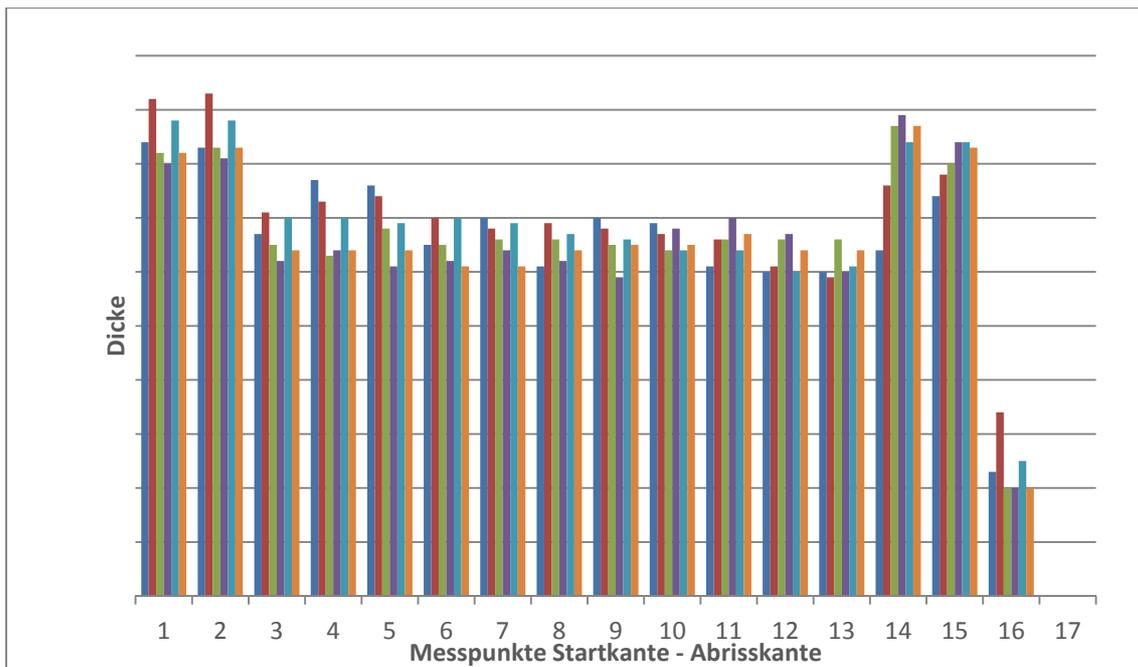


Abbildung 33: Schichtdickenverlauf der unkalandrierten Elektrode (Kathode) in Längsrichtung. Die Start- und Abrisskanten sind deutlich überhöht.

Die Lösung des Problems lag in der Modifikation der Beschichtungsdüse. Damit können nun auch in intermittierender Beschichtungsweise hochwertige Elektroden hergestellt werden.

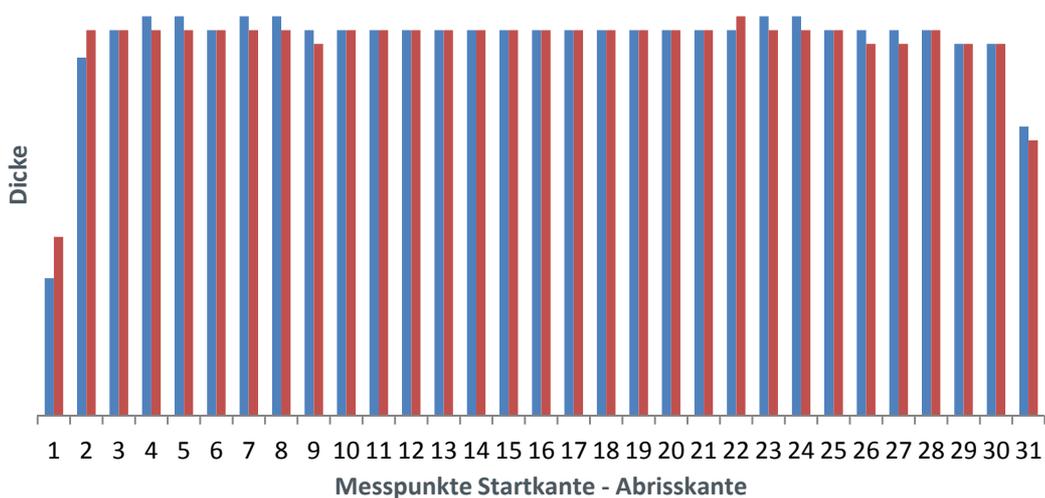


Abbildung 34: Schichtdickenverlauf der kalandrierten Elektrode (Kathode) in Längsrichtung. Die Abweichungen liegen im Bereich  $< \pm 1,5 \%$ .

Neben der Überwindung der Herausforderungen bei der Flächengewichtsverteilung in Längs- und Querrichtung galt es die geometrischen Parameter wie Deckungsgleichheit der Start-, Abriss- und Seitenkanten bei beidseitiger intermittierender Beschichtung einzuhalten. Die Überwachung der Geometrie wurde entscheidend verbessert, in dem ein Kamerasystem installiert wurde.

## **2.2.8 AP 2.6 – Erstellung eines Zell-Lastenheftes für die 60 Ah-Großserie**

Dauer: 01.01.2012 bis 30.06.2012

Die Arbeiten konnten fristgerecht abgeschlossen werden. Jedoch wurde das Lastenheft für 30-40 Ah Zellen im PHEV 2 – Format erstellt und nicht wie ursprünglich geplant für 60 Ah Zellen. Die Gründe hierfür sind nachfolgend dargestellt. Vor allem aus Gründen der Sicherheit, welche die höchste Priorität hatte, war diese Entscheidung unumgänglich.

Die Sicherheitstests an Hochenergie-Forschungsversuchszellen mit Format PHEV 2 (148 mm x 91 mm x 26,5 mm) haben gezeigt, dass man bereits bei dieser Zellgröße (36-38 Ah) an die Sicherheitsgrenzen stößt. Im Falle einer Überladung könnten diese Zellen auf über 70 Ah geladen werden. Solche Zellen sind nicht mehr gefahrlos zu handhaben. Weiterer Gründe sind:

- Das kleinere PHEV2-Format kann packkonformer im E-Fahrzeug angeordnet werden,
- durch Parallelschaltungen kann einfacher ein Totalausfall verhindert werden,
- das PHEV-2 Format ist inzwischen als ISO-Standardgröße normiert,
- im Crash-Fall sind kleinere Zellen sicherer.

Unabhängig von dieser Änderung für die geplante Großserie, werden große Batteriezellen mit 60 Ah in kleinerer Stückzahl hergestellt, sowie die elektrischen und sicherheitsrelevanten Eigenschaften im Vergleich zu 30-40 Ah Zellen erforscht. Die Konzepte und die Anpassung der Versuchsanlagen für 60 Ah Forschungsversuchszellen sind in den AP's 3.2.1, 3.2.2 und 3.3 beschrieben.

### **Zell-Lastenheft für die 30-40 Ah-Großserie**

Diese Zellen sollen die folgenden Anforderungen erfüllen:

- Format PHEV2 (36 Ah)
- Min. 80 % Restkapazität nach 3.000 Zyklen bei 100 % DOD
- (Lade- / Entladerate = 1 C) bei 35 °C
- spezifische Energie  $\geq 170$  Wh/kg
- Energiedichte  $\geq 300$  Wh/l
- spezifische Leistung  $\geq 1.000$  W/kg
- Leistungsdichte  $\geq 1.750$  W/l
- Sicherheit: EUCAR – Hazard-Level 4 oder kleiner, insbesondere bei Überladetest, Nageltest und thermischem Sicherheitstest (thermal soak)
- Vibrationstest (VW 80101) soll bestanden werden

### **Prozesse zum Zell-Lastenheft und Kennzahlen für eine Großserie**

Basierend auf den Erkenntnissen der Erforschung der Fertigungsmethodik wurden die Prozesse für das Lastenheft für eine großserientaugliche 30-40 Ah-Zelle in Prozessfließplänen beschrieben. Der Prozessablauf bildet die Basis für ein Kalkulationsprogramm zur Abschätzung der Kosten. Die für eine Großserie resultierenden Herstellmengen und –preise, benötigte Materialmengen, Materialflüsse und Anlagengrößen sowie Qualitätsnormen und –sicherungsmaßnahmen wurde kalkuliert und dokumentiert.

## **2.2.9 AP 2.7 - Musterbau von runden und prismatischen 30-40Ah-Forschungs-Versuchszellen**

Dauer: 01.10.2011 bis 30.09.2012

### **2.2.10 AP 2.7.1 – Musterbau von Rundzellen**

Dauer: 01.10.2011 bis 30.09.2012

Die Positionierung der mittels Laser ausgeschnittenen Kupfer- und Aluminium-Ableiter erwies sich als äußerst schwierig. Im Unterschied zu prismatischen Zellen, bei der die Ableiter alle die selbe Geometrie (Länge / Breite) haben und plan sind, musste beim Rundwickel die Breite in Abhängigkeit des Wickeldurchmessers ständig nachkorrigiert werden.

Die gebogenen Ableiter werden über zwei halbmondförmige Multikontaktscheiben auf einer Seite zusammengeschweißt

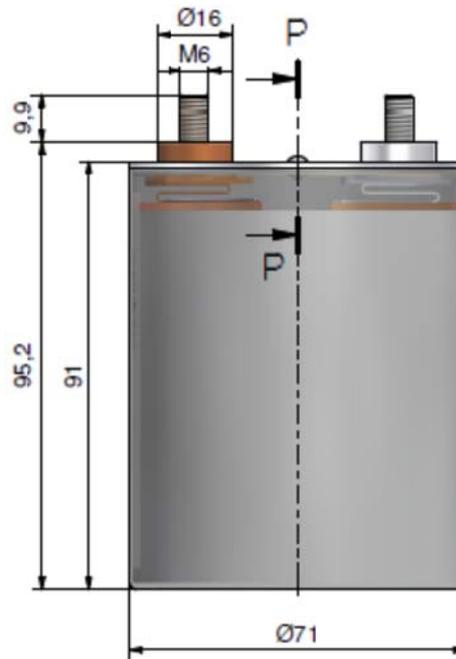


Abbildung 35: Zelle mit 2 halbmondförmigen Multikontaktscheiben auf einer Seite

Der Musterbau für 30-40 Ah Rundzellen ist aufgebaut und erste Versuchsmuster zum Einfahren der Anlagen und Erprobung der Halbtteile wurden erstellt.



Abbildung 36: Rundzelle mit Poldurchführung und Berstmembran.

Die Prozesse zur Herstellung der Forschungsversuchszellen entsprechen dem AP 2.7.2. Die Anlagen und Werkzeuge sind für die Rundzelle weitgehend angepasst. Beispiele hierfür sind:

#### **Wickelmaschine**

Die weitgehend vollautomatische Forschungsversuchsanlage zur Herstellung von Elektrodenwickeln ist eine Sonderkonstruktion mit 2 Wickelstationen, womit sowohl runde als auch prismatische Wickel über einen großen Formatbereich, vom 26650 Zellformat bis 60 Ah Rund- und prismatische Zellen, auf derselben Anlage hergestellt werden können.



Abbildung 37: Vergleich Wickelstation für runde (links) und prismatische Wickel (rechts)

### Elektrolyt-Befüllstation

Durch den modularen Aufbau war es möglich, sowohl Rundzellen als auch prismatische Zellen auf derselben Anlage zu fahren. Hierzu wurden nur die Aufnahmen für die Zellgehäuse getauscht.

Der Musterbau für 30-40 Ah Zellen ist aufgebaut. Schwerpunkte im Berichtszeitraum waren die Herstellung der Halbeile mit gefederter Multikontaktscheibe und der Bau von Forschungsversuchszellen. Abbildung 38 zeigt eine 36 Ah C//NMC-Forschungsversuchszelle im Rundzellenformat mit elektrisch isolierten Pol-Durchführungen, Berstmembran und zusätzlicher Außenisolation.



Abbildung 38: Rundzelle mit Poldurchführung, Berstmembran und Außenisolation.

Nachfolgend werden die Fertigungsschritte im Musterbau bis zur Zellprüfung beschrieben:

### Herstellung der Halbeile

Die Herstellung der Halbeile und Zellkomponenten für den Bau erster Forschungsversuchszellen mit gefederter Multikontaktscheibe konnte bis KW 28/2012 abgeschlossen werden.

- Becher (Abmessungen  $h=91\text{ mm} \times \varnothing=71\text{ mm}$ )
- Kontaktblech zwischen Wickel und Becherboden
- Isolationsfolie Becher innen

und die vorgefertigten Zellkomponenten

- Elektrodenwickel
- Deckel mit Kontaktfederelement mit Plus- und Minuspol

Durch das kreuzförmige Kontaktblech aus Aluminium wird der Anpressdruck von Wickel (positive Elektrode) zum Becher signifikant erhöht. Abbildung 39 zeigt dass die Federkraft zu einem relativ starken Abdruck auf der positiven Elektrode führt. Ein niedriger Innenwiderstand  $R_i$  wird dadurch sichergestellt.



Abbildung 39: Abdruck vom Kontaktblech auf Plusseite des Wickels.

In Abbildung 40 ist der Wickel mit Kontaktfederelement zu sehen. Der Becher ist innen mit einer PEEK Isolationsfolie ausgekleidet. Die Separatorenenden werden mit 2 Polyimid-Klebebändern gesichert. Nach Hochvakuumtrocknung unter Schutzgas ( $N_2$ ) erfolgt die Montage von Becher, Wickel und Deckel (Abbildung 41). Wegen der möglichen Wasseraufnahme muss diese innerhalb von max. 5 min. nach Entnahme aus dem Trockenofen erfolgt sein.



Abbildung 40: Wickel mit vormontiertem Kontaktfederelement und Aluminiumbecher



Abbildung 41: Trocken montierte Zelle vor Laserschweißung von Deckel mit Becher

Die Laserschweißung musste wegen des Federkontakts unter Druck erfolgen. Die Güte der Schweißung wurde durch Druckbeaufschlagung und Lecksuchspray geprüft. Anschließend wurde das Gehäuse mit einem Schrumpfschlauch elektrisch isoliert; siehe Abbildung 42.



Abbildung 42: 30-40-Ah Rundzelle mit Schrumpfschlauch für die elektrische Außenisolation

Danach wird die Zelle für die Formation vorbereitet. Dazu wird ein Entgasungsventil über dem Befüllloch montiert und Zellen in die Formationskiste eingeschraubt; siehe Abbildung 43.



Abbildung 43: Formationskiste mit montierten Rundzellen

Die weiteren Prozesse sind:

- Formieren mit für die Rundzelle angepassten Parametern; vgl. Abbildung 44
- Entgasen der Zellen und Laserverschweißen des Befüllloches
- Zellen testen im Prüffeld; vgl. Abbildung 45



Abbildung 44: Elektrische Kontaktierung während der Formation der Rundzelle



Abbildung 45: Zyklen und elektrische Test im Prüffeld (Sicherheitsprüfschrank)

Der Musterbau für Großzellen ist erfolgreich abgeschlossen. Es liegen Ergebnisse aus runden Forschungsversuchszellen vor.

### 2.2.11 AP 2.7.2 – Musterbau von prismatischen Zellen

Dauer: 01.10.2011 – 30.09.2012

Basierend auf Vorarbeiten des AP 2.2. „Konzeption des Zellmusterbaus für 30-40 Ah-Zellen“ und des AP 2.8 „Erforschung der Fertigungsmethodik für runde und prismatische 30-40 Ah-Zellen auf Basis dreier Zellchemiesysteme“ konnten am 27.10.11 die ersten prismatischen Zellen im Musterbau hergestellt.

Ende 2011 konnte die erste C//NMC-Zelle mit 30 Ah und C//LFP mit 24 Ah hergestellt werden. Die Hauptfrage dabei war, können die bisherigen guten Ergebnisse kleiner Pouch-Laborzellen 053562 (ca. 60 mAh) und 503562 (ca. 850 mAh) auf die großen Zellen übertragen werden. Dazu wurden bis KW 51-2011 132 Zellen in 48 Versuchsserien hergestellt. Die vielen Versuchsserien dienten dazu:

- die Maschinen über die gesamte Prozesse zu erproben,
- die Anlagen über Feinjustierungen und Modifikation z. B. Maschinenwerkzeugen an die Vorgaben anzupassen,
- die Zellhabteile unter Berücksichtigung aller Maschinentoleranzen über die gesamte Prozesskette aufeinander abzustimmen,
- das Zelldesign z.B. in Bezug auf höchst mögliche Volumenausnutzung weiter zu erforschen.

Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass die im Projekt geplanten Ziele in Bezug auf die Energiedichten (170 Wh/kg und 300 Wh/l) erreichbar sind, siehe Tabelle 7.

	Projektziel	Wettbewerber Asien	VW VM LFP	VW VM NMC
Volumen [l]		0,357 l	0,357 l	0,357 l
Gewicht [kg]		0,72 kg	0,71 kg	0,82 kg
Kapazität [Ah]		24 Ah	28 Ah	37 Ah
Gravimetrische Energiedichte [Wh/kg]	170 Wh/kg	124 Wh/kg	128 Wh/kg	166 Wh/kg
Volumetrische Energiedichte [Wh/l]	300 Wh/l	247 Wh/l	251 Wh/l	378 Wh/l
Nageltest	≤ Hazard Level 4	Hazard Level 4	Hazard Level 3	Hazard Level 4b
Kurzschlussstest		Hazard Level 2	Hazard Level 2	Hazard Level 2
Überladetest	≤ Hazard Level 4	Hazard Level 4	Hazard Level 2	Hazard Level 5
Ofentest 200°C	≤ Hazard Level 4	Hazard Level 6	Hazard Level 4b	Hazard Level 6

Tabelle 7: Ergebnisse 2011

Nachfolgend werden einige Details zur Zelle und zu den Prozessen im Musterbau dargestellt:

#### Sicherheit im Umgang mit geladenen Zellen

Höchste Priorität hat die Sicherheit von Mensch und Umwelt. Die großen Lithium-Ionen Zellen haben einen sehr hohen Energieinhalt und können bei unsachgemäßer Handhabung und / oder Baufehlern Mitarbeiter und Umwelt erheblich gefährden, u.a. durch Brand- und Explosionsgefahr, Freisetzung von krebserzeugenden Nickelstäuben und giftigem Fluorwasserstoff (HF).

Die Sicherheitsmaßnahmen wurden mit dem Start des 30-40 Ah Zellmusterbaus nochmals erheblich verschärft und der Personenkreis für das Handling aktivierter Zellen auf wenige, fachlich besonders geschulte Mitarbeiter übertragen.

### **Sicherheit bei der Herstellung der Zellkomponenten**

Insbesondere stellt die Herstellung von Zellen mit NMC-Kathodenmaterialien hohe Anforderungen an den sicheren Umgang mit Gefahrstoffen über die gesamten Prozesse. Hierbei werden frühzeitig Institutionen wie TÜV, BG und die Werkssicherheit der VARTA Microbattery mit eingebunden, um im Hinblick auf eine spätere Großserienfertigung die Prozesse in Bezug auf die hohen Sicherheitsanforderungen beherrschen zu können.

Neue innovative und umweltfreundliche Fertigungsmethoden sind deshalb für eine sichere und wirtschaftliche Großserienfertigung in Deutschland äußerst wichtig. Ein Ansatz der hier verfolgt wird, ist der Einsatz wässriger Lösemittel anstelle organischer Lösemittel zur Herstellung der Elektroden.

### **Zelldesign für hohe Volumenausnutzung des Zellgehäuses**

Neben der Zellchemie und der Elektrodenherstellung ist das Zelldesign ein wichtiger Parameter um die Energiedichte zu erhöhen. Die zum Patent angemeldeten Fertigungsmethoden zur Herstellung von Zellwickeln und der Rändelung von Elektrodenbändern bringen Wettbewerbsvorteile.

Nachfolgend ist der Status des Musterbaus für prismatische Forschungsversuchszellen 30-40 Ah kurz beschrieben. Alle Arbeiten liegen im Plan und konnten bis zum 30.09.2012 abgeschlossen werden.

Aus Qualitätsgründen wurden alle Prozesse des Zell-Musterbaus im Trockenraum installiert.

### **Wickelherstellung mit der vollautomatischen Wickelanlage**

Die Maschinenleistung liegt derzeit bei ca. 5 Min / Wickel. Bis zum Ende des AP's soll die Prozesszeit weiter optimiert werden. Das Ende der Anode wurde in den Wickelradius verlegt um einen homogenen Anpressdruck über die Seitenflächen zu erreichen.

Für zukünftige Zellen mit CID (Current Interruption Device) müssen die Ableiterpositionen neu programmiert werden.

### **Wickel werden mit Tischpresse auf Dickenmaß gepresst**

Nach dem Wickeln werden die Wickel auf Maß gepresst. Vorteile des Pressens sind die Stabilisierung gegen Teleskopierung (Verrutschen der Lagen untereinander) und die präzise Montage von Wickel in Becher.

Es wurden sowohl Versuche bei Raumtemperatur als auch mit beheizten Pressplatten durchgeführt.

### **Gepresster Wickel wird in Halteplatten fixiert**

Nach dem Pressen wird der Wickel mit Klebebändern fixiert und in Halteplatten verspannt. Wegen Kurzschlussgefahr muss sichergestellt sein, dass sich die Lagen im Wickel in keinem Arbeitsschritt verschieben können.

### **Zellenvormontage Poldurchführung mit Laserschweißtechnologie**

Bei diesem Prozess werden die Ableiter auf Länge geschnitten – hier noch mit Handzange, eine Vorrichtung für präziseren und gratfreien Schnitt wird erforscht – und die Kontaktbleche mittels Laser angeschweißt.



Abbildung 46: Ablängen der Ableiter im Musterbau

### **Deckel auf Zelle montieren**

Nach der Montage der Ableiter wird der Deckel montiert und anschließend wird der Wickel mit Platten fixiert.

### **Wickel wird im Vakuum-Trockenofen getrocknet**

Die Wickel werden ca. 8 h im Vakuum und sich wiederholenden Spülvorgängen mit wasserfreiem Inertgas getrocknet.



Abbildung 47: Befüllung Pink-Ofen

### **Zellenendmontage Deckel mit Gehäuse verschweißen**

Nach dem Trocknen werden die Spannplatten entfernt und der Wickel mit Deckel in den Becher eingeschoben. Anschließend wird der Deckel mit dem Gehäuse lasergeschweißt.

### **Vormontierte Zelle wird im Vakuum-Trockenofen getrocknet**



Abbildung 48: Ausheizung im Ofen

### **Getrocknete Zelle wird mit Elektrolyt befüllt**



Abbildung 49: Elektrolyt-Befüllung

### **Befüllte Zelle mit Überdruckventil, Transport zur Formation**

Nach der Formation wird die Zelle im Musterbau entgast und das Loch der Elektrolytbefüllung verschlossen. Die Prozesszeit auf der Anlage konnte von 5 min pro Wickel auf 3,5 min pro Wickel reduziert werden.

### **Problem Telekopieren auf Wickel Anlage**

Die Elektroden werden zusammen mit dem Separator auf einem sogenannten Wickelschwert aufgewickelt. Dabei wird im ersten Schritt der Separator zugeführt und vom Wickelschwert über Klemmung gehalten. Nach jeweils einer Umdrehung werden zuerst die Anode und dann die Kathode zugeführt. Nach der eingestellten Anzahl von Wickelungen wird der Wickel mit einem Klebeband fixiert und das Wickelschwert herausgezogen. Durch elektrostatische Aufladung und die hohe Haftreibung zwischen Separator und Wickelschwert können die inneren Lagen des Separators aus dem Wickel herausgezogen werden. Das sogenannte Telekopieren tritt auf wie in Abbildung 50 dargestellt.



Abbildung 50: Ausschnitt aus der vollautomatischen Wickelanlage

Zur Lösung des Problems wurden verschiedene Lösungsansätze verfolgt:

- Installation eines Deionisierungsstabs
- Erprobung modifizierter Wickelschwerter zur Reduzierung der Reibung

Durch Nuten wurde die Auflagefläche weiter reduziert. Die Anhaftung vom Separator wurde dadurch wesentlich verringert. Ein weiterer Lösungsansatz war die Verwendung eines sogenannten „verlorenen Dorns“. Hierbei wird der Wickel auf eine dünne Aluminiumplatte aufgewickelt, welche nach dem Wickeln im Wickel verbleibt. Dies ist eine häufig eingesetzte Methode bei Rundzellen. Zielführend war aber letztendlich nur die Nuteneinbringung in das Schwert.

### Feinschlussprüfung

Die Qualitätskontrolle wurde um eine Impedanz-Feinschlussprüfung erweitert. Die Messparameter dafür sind: 100 V, 1.000 Hz. Die Vorteile sind:

- Frühzeitige Erkennung von Ausschuss → Einsparung von Material und Prozesszeit
- Reduzierung der Gefährdung durch interne Kurzschlüsse bei geladenen Zellen

### Verbesserung der Schneidtechnik zum Ableitertrimmen

Für die Erforschung wurden folgende Randbedingungen vorausgesetzt:

- Saubere Schnittgüte ohne Metallspäne oder Metallflimmer
- Reproduzierbare Schnittlänge
- Ableiter werden auf Zug nicht belastet
- Kurze Handhabungszeit
- Einhalten der Sicherheitsvorschriften



Abbildung 51: Ausschnitt aus dem Schnittwerkzeug mit Messersatz, Absaugung und Schutzeinhausung



Abbildung 52: Schnittwerkzeug eingebaut in pneumatischer Presse mit Absaugung im Trockenraum

### Zellaußenisolierung

Der Einsatz der Batteriezellen im Automobil fordert vom Gehäuse isolierte Pole. Zusätzlich soll auch das Gehäuse eine elektrische Isolation erhalten. Damit sollen z.B. bei der Batteriemontage Kurzschlüsse vermieden werden. Auch in dem Fall, dass eine Elektrode z.B. bei hohen Schockwirkungen oder im Falls eines Unfalls mit dem Gehäuse in Kontakt kommt, wird verhindert, dass die Batterie selbst kurzgeschlossen wird bzw. unter Potential steht. Desweiteren wird das Korrosionsrisiko reduziert.

Unter den getesteten Materialien u.a. PP, PE, PCV, PET, PI erwies sich PET mit einer Dicke von 35 µm als gut geeignet. Der Kleber der Folie basiert auf Kautschuk. Die Folie wird mittel CO<sub>2</sub>-Laser ausgeschnitten und perforiert und anschließend in eine Positionierhilfe eingelegt und mit dem Zellboden verklebt; vgl. Abbildung 87. Danach werden die Seiten von Hand angelegt (Abbildung 88) und blasenfrei mit einem Rakelwerkzeug glattgestrichen. Die überstehenden Etikettenränder an der Deckeloberfläche werden mit einem Keramikmesser abgetrennt (Abbildung 54).

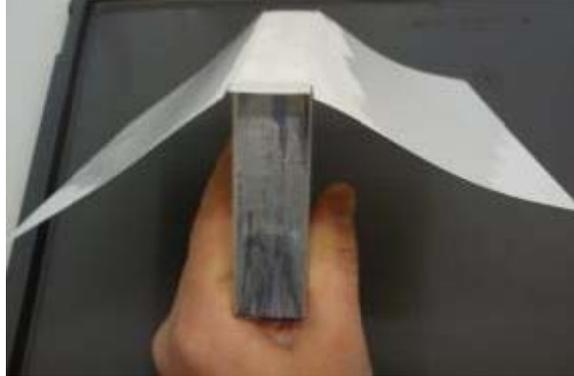


Abbildung 53: Anlegen der Seiten von Hand

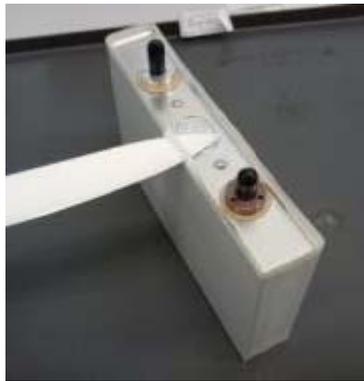


Abbildung 54: Entfernung des überstehenden Etikettenrandes mit einem Keramikmesser

## **2.2.12AP 2.8 - Erforschung der Fertigungsmethodik für runde und prismatische 30-40 Ah-Zellen auf Basis dreier Zellchemiesysteme**

### **2.2.12.1 AP 2.8.1 - Erforschung der Fertigungsmethodik für Rundzellen**

Dauer: 01.07.2010 bis 30.09.2012.

Das Zellformat für eine 30 Ah Rundzelle wurde zusammen mit Volkswagen spezifiziert (siehe Abbildung 90). Das Design der Pole wurde im Projekt erforscht. Die Zellhöhe (Becher + Deckel) und das Innenvolumen der Zelle wurde der prismatischen Zelle von AP 2.8.2 gleichgesetzt. Damit konnten die Vor- und Nachteile von runden und prismatischen Zellen im direkten Vergleich erforscht werden. Runde Zellen haben den Vorteil, dass die Elektroden viel weniger oder gar nicht aufgrund von Volumenänderungen Quellen können. Dies war besonders wichtig für die Erforschung von nano-Si-haltigen Anodenelektroden.

Soweit relevant wurden die Werkzeugsätze für die Forschungsversuchsanlagen für die Rundzelle Ø: 71 mm x H: 91 mm zusammen mit den Anlagen bestellt. Becher und Deckel wurden bei einem sehr erfahrenen Hersteller bestellt.

Halbteile und Anlagentechnik wurden spezifiziert und bestellt. Der Schwerpunkt des AP 2.8.1 lag in der Erforschung der Fertigungsmethodik in Bezug auf die geplanten Zellchemiesysteme (C//NMC und

C//LiFePO<sub>4</sub>). Die Fertigungsmethodik musste auf die zu erforschenden Materialien optimiert werden. Dies war ein kontinuierlicher Prozess an dessen Ende folgende Schwerpunkte bearbeitet wurden:

- Nachweis der Wettbewerbsfähigkeit
- Nachweis der Skalierbarkeit der Prozessschritte
- Fertigungsanweisungen
- Verfahrensanweisungen
- Zeichnungen
- Stücklisten
- Nachweis der Sicherheit der Zellen
- Prüfanweisungen
- Businessplan für eine spätere geplante Massenfertigung in Deutschland

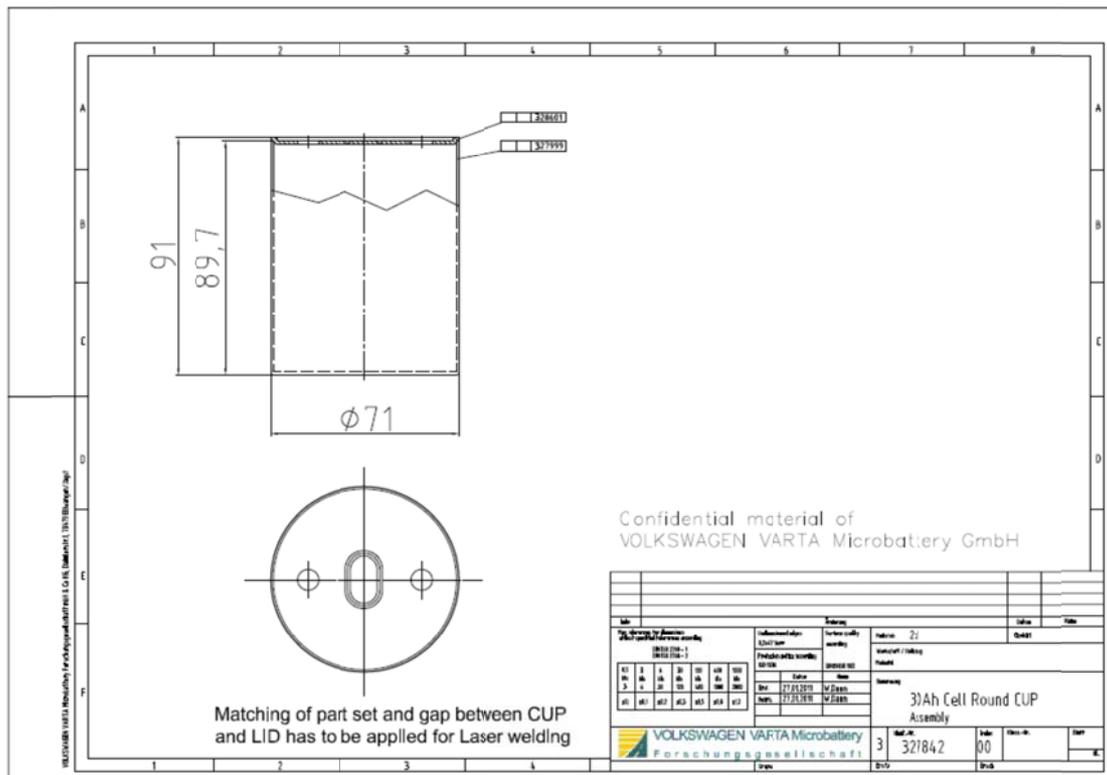


Abbildung 55: Konstruktionszeichnung der assemblierten Becher und Deckel für 30 Ah-Rundzellen.

### Zellgeometrie

Die Zellgeometrie für die 30 Ah Zelle ist festgelegt.



Abbildung 56: 3-D Darstellung der 30 Ah Lithium-Ion Rundzelle

### **Schweißen von Deckel und Becher**

Die Prozessparameter für die Verschweißung mittels Laser von Deckel mit dem Becher wurden erforscht.



Abbildung 57: 30-Ah Lithium-Ion Rundzelle

### **Zelleigenschaften**

Die elektrochemischen Berechnungen zur Flächenbelastung, Elektrodendicke, Zellbalance wurden aus den Versuchen der besten kleineren Forschungsversuchszellen erstellt. Ziel war es, Forschungsversuchszellen mit 30 Ah (C/NMC) und 24 Ah (C/LFP) herzustellen. Mit diesen Zellen sollten 1000 1 C-Lade-/ Entladezyklen bei 35 °C und 70 % DOD nachgewiesen werden. Die Ergebnisse mit C/Si-Komposit-Anode zeigten erhebliche Schwächen des Systems auf.

### **Berstmembran**

Das Design des Deckels wurde in Bezug auf die spezifizierten Drücke und Drucktoleranzen der Berstmembran optimiert. Die Berstmembran wurde mit einer klappbaren Lasche gesichert, um herumfliegende Teile zu verhindern.



Abbildung 58: Deckeldesign bis Mitte 2011 (links) und überarbeitetes Deckeldesign mit präziserem Öffnungsdruck und Sicherheitslasche (rechts)

### **Kontaktierung Wickel und Zelldurchführung**

Die Fertigungsmethodik von runden und prismatischen Zellen unterscheidet sich primär durch folgende Merkmale:

- Der Herstellung der Wickel, hier insbesondere in der Ableiteranordnung (vgl. AP 2.7.1). Die Elektroden und Separatoren werden auf einem Aluminium-Dorn aufgewickelt.
- Der Kontaktierung der Elektrodenableiter an die Kontaktbleche der Poldurchführungen.

### **Elektrolybefüllung**

Die Elektrolytbefüllung konnte im Vergleich zur prismatischen Zellen nur erschwert erfolgen. Bei der Rundzelle kann der Elektrolyt auf der Unterseite nur über den Wickeldorn zufließen. Ein Adapter für die Aufnahme der Zelle in der Elektrolyt-Dosierstation wurde erstellt. Die Parameter für die Befüllung konnten damit erforscht werden.

Die Arbeiten wurden eng mit dem AP 2.7.1 verknüpft. Der Schwerpunkt der Arbeiten im Berichtszeitraum war die Kontaktierung der Elektrodenwickel und die Poldurchführung. Hierzu wurden 3 Fertigungsmethoden erforscht, die nachfolgend kurz beschrieben sind:

### **Fertigungsmethode mit zwei halbmondförmigen Multikontaktscheiben auf einer Seite**

Die Positionierung der mittels Laser ausgeschnittenen Kupfer- und Aluminium-Ableiter war äußerst schwierig. Die weiteren Versuche zeigten, dass diese zum Patent angemeldete Fertigungsmethode sehr gut auf prismatische Wickel anwendbar ist, bei Rundzellen konnte jedoch die exakte Positionierung der Ableiter über viele Wickel nicht gehalten werden. Das Problem der ungenauen Positionierung ist prinzipiell lösbar, dazu müsste aber die Wickelmaschine komplett umgebaut werden. Die wesentlichen Umbauten wären:

- Verlagerung des Laserschnitts so nah wie möglich an den Wickeldorn. Positionskorrekturen könnten damit schneller und exakter ausgeführt werden.
- Einbau weiterer Positionssensoren zur exakten Ermittlung der Lage der Ableiter.
- Anpassung der Software für die Maschinensteuerung.

Als weiteres Problem zeigte sich, dass die radial gebogenen Ableiter beim Bündeln und Schweißen an die Kontaktbleche sehr leicht ein oder sogar komplett abreißen können. Das Konzept mit zwei halbmondförmigen Multikontaktscheiben wurde deshalb zurückgestellt.

### **Fertigungsmethode mit 2 gegenüberliegenden Multikontaktscheiben (geschweißt)**

Es wurde eine Konstruktion mit 2 Multikontaktscheiben dargestellt, wobei diese direkt auf die gestauchten, beschichtungsfreien Ränder der Alu- und Cu-Trägerfolie mittels Laser aufgeschweißt wurden.



Abbildung 59: Zellkonstruktion mit aufgeschweißten Multikontaktscheiben

Nachteile dieser Konstruktion waren:

- Elektrolyttränkung ist erschwert
- Inhomogene Schweißung. Gefahr, dass der Laserstrahl den Separator beschädigt.
- Evtl. Abbrand kann nicht abgesaugt werden => Gefahr von Kurzschlüssen
- Geringere Kapazität

#### Fertigungsmethode mit Multikontaktscheibe und Federkontakt

Als Alternative zu angeschweißten Multikontaktscheiben wurde ein Konzept mit Federkontakten erarbeitet. Abbildung 60 zeigt den schematischen Konstruktionsaufbau einer entsprechenden Forschungsversuchszelle.

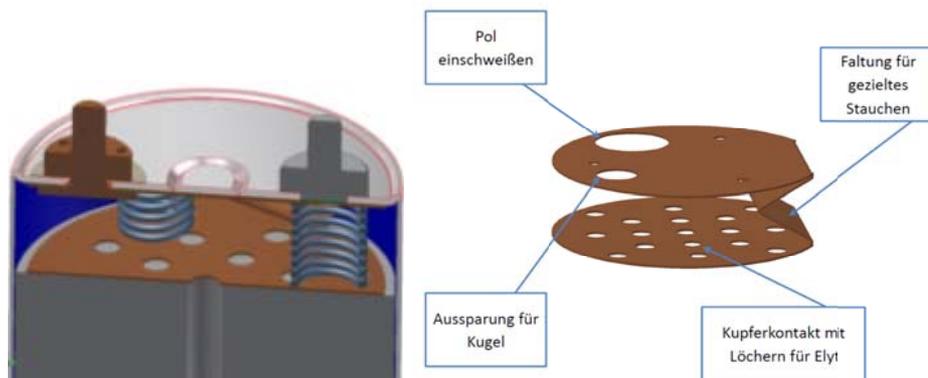


Abbildung 60: Zellaufbau mit Multikontaktscheibe (links) und Detaildarstellung der Multikontaktscheibe (rechts)

Schlussbericht Zuwendungsempfänger  
Förderkennzeichen: 0327889 A

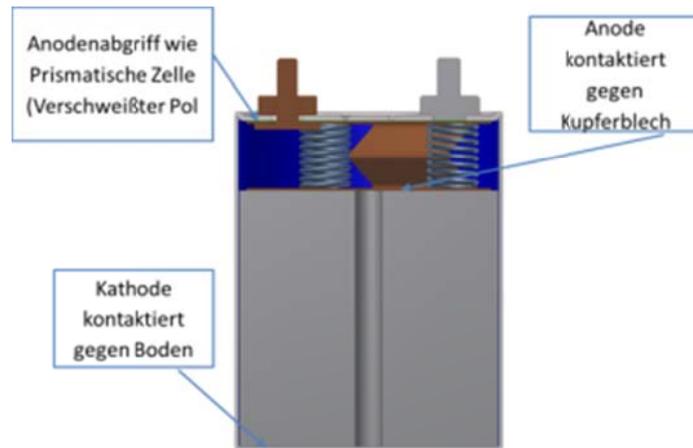


Abbildung 61: Gesamtansicht der Rundzelle mit gefederter Multikontaktscheibe

Nachteile dieser Konstruktion waren:

- Kontaktprobleme im Falle von Vibration und Schock
- Hohe Übergangswiderstände durch Passivierung (Alterung) der Materialien
- Plus-Pol auf Gehäuse

#### Weiterarbeit

Fertigungsmethode C wird favorisiert und erste Forschungsversuchszellen bis KW 28/2012 gebaut. Für vergleichende Untersuchungen soll die Kapazität der bisherigen prismatischen Zellen im PHEV 2 Format entsprechen ( $\approx 36$  Ah).

Die Erforschung der Forschungsmethodik für 30-40 Ah Rundzellen konnte erfolgreich und fristgerecht abgeschlossen werden. Als besonders herausfordernd erwies sich die Kontaktierung der Elektroden an die Pole. Hierbei wurden unterschiedliche Fertigungsmethoden für die Kontaktierung des Wickels und der Pole erforscht:

- Wickel mit Laser geschnittenen Ableiter
- Die Anbindung erfolgte ähnlich zu den prismatischen 30-40 Ah PHEV2-Forschungsversuchszellen. Die radialgebogenen Ableiterfahnen rissen jedoch beim Bündeln und Schweißen an die Kollektorbleche sehr leicht ab.
- Wickel mit angeschweißter Multikontaktscheibe
- Dies ist die am häufigsten verwendete Methode Ableiter an die Pole anzubinden. Die Anbindung ist jedoch relativ unpräzise und es gibt Gefahren durch möglichen Schweißabbrand-, funken die zu späteren und gefährlichen Kurzschlüssen führen können.
- Kontaktierung mittels Federkontakten. Diese Methode wurde favorisiert und umgesetzt.

Abbildung 62 zeigt den schematischen Konstruktionsaufbau einer entsprechenden Forschungsversuchszelle mit Federkontakten. Die Kontaktbleche, wie z.B. das Sigma-Blech (Abbildung 63), die Polbolzen und Dichtungen wurden überwiegend mittels einfacher Handwerkzeuge hergestellt und anschließend von Hand montiert.

Schlussbericht Zuwendungsempfänger  
Förderkennzeichen: 0327889 A

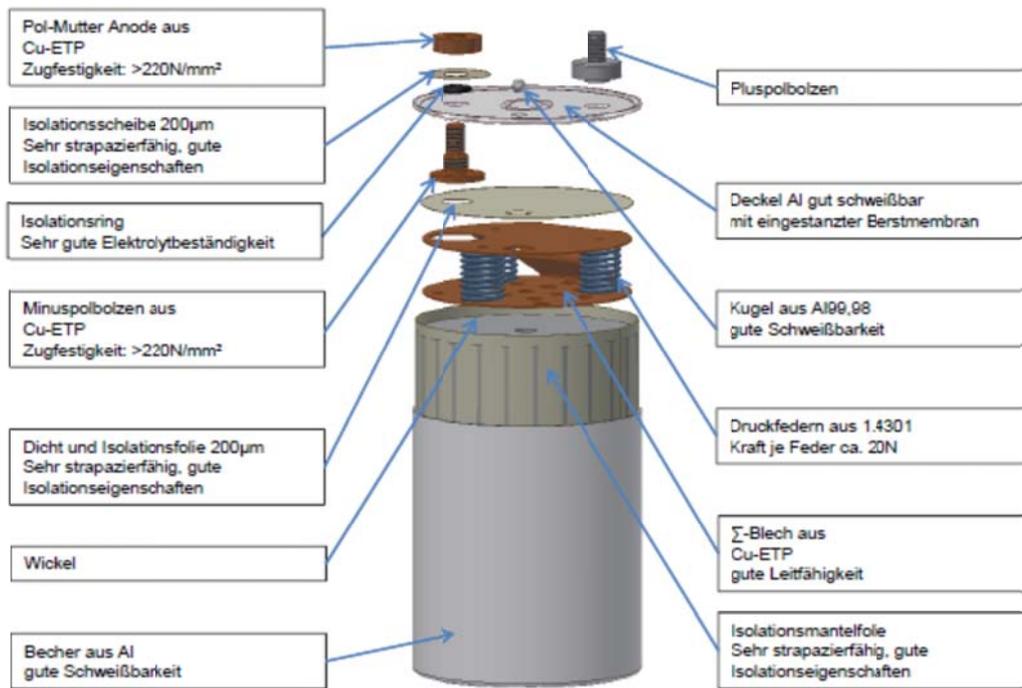


Abbildung 62: Explosionsdarstellung der Rundzelle und ihrer Einzelteile



Abbildung 63: Werkzeug zur Herstellung der Multikontaktscheibe (Sigma-Blech)



Abbildung 64: Vormontierte Kontaktierungseinheit für Plus- und Minuspol

### **Zusammenfassung**

Ein Konzept für die Fertigungsmethodik der Rundzelle wurde erforscht und zur Demonstration wurden Zellen im Musterbau hergestellt. Damit war es möglich die Wechselwirkung von Zellchemie und Zellgeometrie hinreichend und im Vergleich zu prismatischen Zellen zu untersuchen. Die Fertigungsmethodik für Rundzellen, wurde nicht weiter verfolgt, da die prismatische 30-40 Ah Zelle im PHEV2-Format favorisiert wurde. Dies war das Ergebnis des Meilensteins MS 5, um das gewünschte Kostenziel zu erreichen.

#### **2.2.12.2 AP 2.8.2 - Erforschung der Fertigungsmethodik für prismatische Zellen**

Dauer: 01.07.2010 bis 30.09.2012

Das Zellformat für eine 30 Ah prismatische Zelle wurde zusammen mit Volkswagen spezifiziert (siehe Abbildung 65). Die Arbeiten in AP 2.8.2 deckten sich im Wesentlichen mit denen von AP 2.8.1 und wurden deshalb hier nicht nochmals beschrieben.

Aus den Vorversuchen zeichnete sich ab, dass das prismatische Format nicht ausreichend stabil gegen Drücke ist. Die Zellen können deshalb vermutlich nur unter Verwendung zusätzlicher seitlicher Stützplatten oder spezieller Aufnahmen hergestellt, geprüft und gelagert werden.

Die Anlagen dazu wurden aufgebaut und erprobt, um die prozess- und materialspezifische Fertigungsmethodik für dieses Format für die unterschiedlichen Zellsysteme in der Tiefe erforscht werden konnte.

Schlussbericht Zuwendungsempfänger  
Förderkennzeichen: 0327889 A

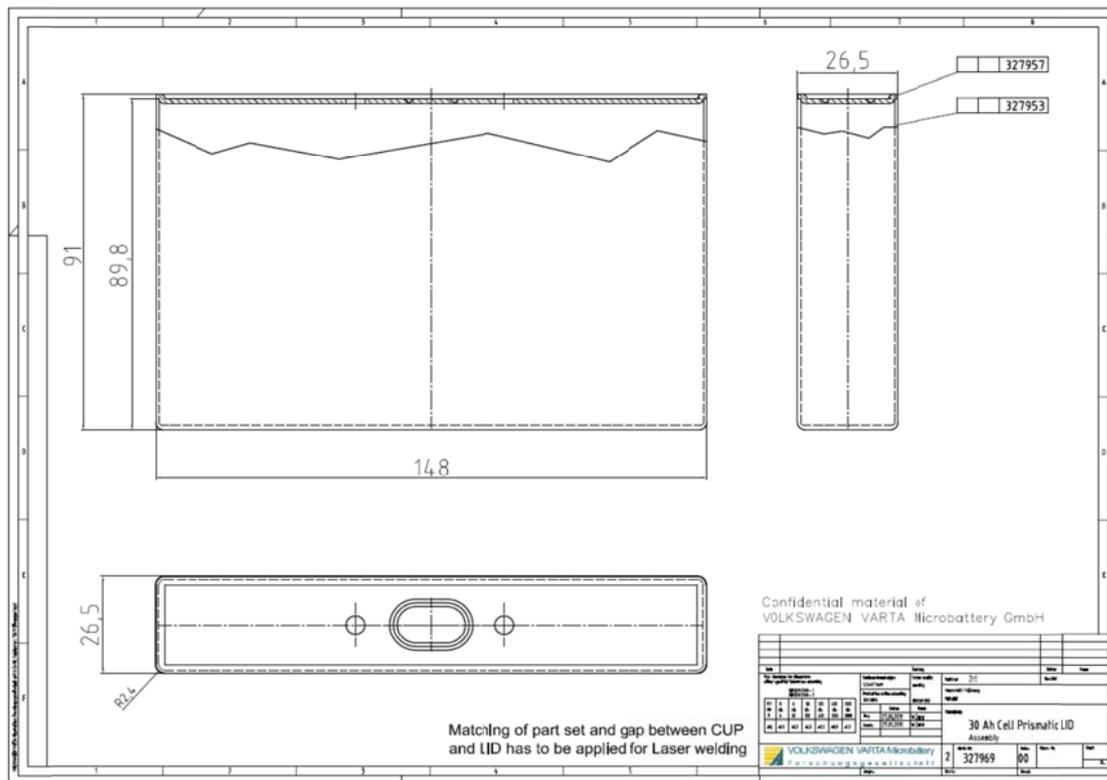


Abbildung 65: Konstruktionszeichnung der assemblierten Becher und Deckel für die prismatische 30-Ah Zelle

### Zellgeometrie

Die Zellgeometrie für die 30 Ah Zelle wurde wie folgt festgelegt.

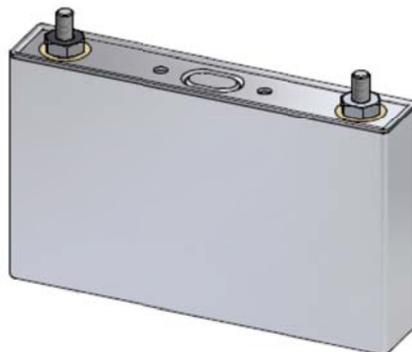


Abbildung 66: 3-D Darstellung der prismatischen 30 Ah-Zelle

### Schweißen von Deckel und Becher

Die Schweißung von Becher mit Deckel musste über eingehende Parameter- und Software-Studien optimiert werden. Dies betraf insbesondere die Schweißung der Eckbereiche, wie auch auf Abbildung 67 erkennbar ist.



Abbildung 67: Prismatische 30 Ah-Lithium-Ion-Zelle

### Kontaktierung

Die bisher erstellten Konstruktionen für Ableiter und die Poldurchführungen wurden im Hinblick auf geringeres Gewicht und einfacherer Montage weiter erforscht. Die Teilkonstruktion und die Assemblierungsmethoden wurden im Vergleich zur Rundzelle etwas einfacher gestaltet.

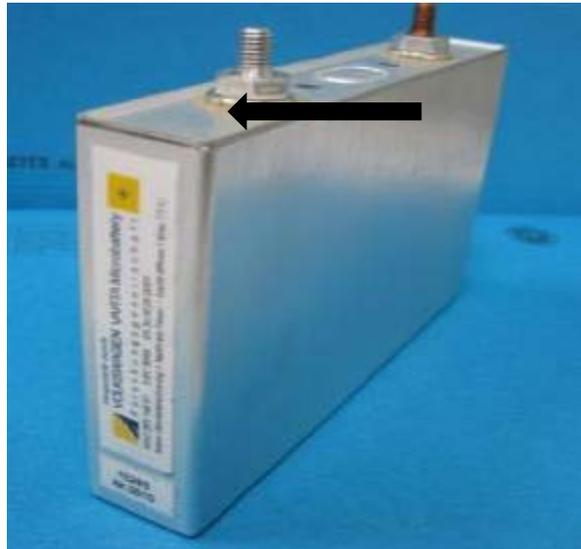


Abbildung 68: 30 Ah Lithium-Ion prismatische Zelle. Der Pfeil zeigt die Nahtstelle zwischen Deckel und Becher, welche mittels Laser verschweißt wird. In der Deckelmitte ist die Berstmembran eingepägt.

Eine besondere Herausforderung bereitete das Anschweißen von bis zu 80 Ableiterföhnchen an die Polbleche. Die Oberflächen von Kupferwerkstoffen haben die Eigenschaften den Laserstrahl stark zu reflektieren, so dass der Energieeintrag zum Aufschmelzen gering ist. Die Leistung des Lasers mit 400 Watt arbeitet hier bereits im obersten Leistungslimit.

Im Unterschied zu den Wettbewerbern, welche überwiegend mit Ultraschall verschweißen, kann mittels Laser eine sehr kurze Verbindung und damit eine höhere Volumenausnutzung, erreicht werden.

### Berstmembran

Das Deckeldesign wurde in Bezug auf die spezifizierten Drücke und Drucktoleranzen der Berstmembran weiter optimiert und die Membran mit einer klappbaren Lasche gesichert. Bei der Assemblierung Deckels gab es erhebliche Probleme durch Haarrisse im Bereich der Einprägungen der Berstmembran. Das Problem konnte durch Tempern der Deckel weitgehend entschärft werden.

### **Gehäuseisolation und Gehäuseabdichtung**

Die Materialien für die innere elektrische Isolierung und der Abdichtung wurde für die erste Zellgeneration erforscht und die Fertigungsmethodik, welche überwiegend manuell erfolgt, festgelegt. Parallel sind weitere Designvarianten in Erprobung.

Das Design (PHEV2-Format) und die Parameter für die Generation 1, 30-40 Ah prismatische Zelle, sind weitgehend festgelegt. Als weitere Sicherheitsmaßnahme gegen Fehlstrom und Korrosion wurde das Aluminium-Gehäuse mit einer 50-60 µm dicken Kunststoffolie seitlich und am Boden isoliert (Abbildung 69).



Abbildung 69: 30-40 Ah PHEV2 Zelle mit Kunststoffolie als Isolation und Korrosionsschutz

### **Fertigungsmethode für Forschungsversuchszellen mit Sicherheitselementen**

Die Sicherheitsprüfungen nach VW-Spezifikationen und internationalen Standards haben gezeigt, dass die erforschten NMC-Hochenergiezellen bei bestimmten Testbedingungen, insbesondere bei „Überladung“ und „Thermischen Stabilitätstest“ sehr kritisch reagieren können.

Daher wurden verstärkt unterschiedliche Sicherheitselemente und Fertigungsmethoden zu deren Integration in oder außerhalb der Zelle erforscht. Nachfolgend werden diese kurz beschrieben:

#### a) Current-Interruption-Device (CID)

Die Reaktionsmechanismen, die beim Überladen von Zellen mit Kathodenmaterialien wie Lithium-Nickel-Kobaltoxid (LCO) oder Lithium-Nickel-Mangan-Kobaltoxid (NMC) sind hinreichend bekannt. Durch die weitere Delithierung oberhalb von 4,2 Volt kann die Gitterstruktur des Kathodenmaterials soweit destabilisiert werden, dass diese unter spontaner Zersetzung mit Freigabe von stark oxidativen Sauerstoff zu Feuer oder sogar Explosionen führen kann. Alle Zellen mit dieser Chemie besitzen daher passive und aktive Sicherheitselemente, um eine Gefährdung von Mensch und Umwelt zu verhindern.

18650-Zellen haben ein CID, welches im Falle einer fehlerhaften Sicherheitselektronik, die Stromzufuhr über eine Art pneumatischen Schalter trennt. Im Projekt sollte erforscht werden, ob diese Technologie sich auch auf große Batteriezellen im PHEV2-Format übertragen werden kann. Die Konstruktion hierfür wurde erstellt, und die Halbdteile ausgelöst. Das Konzept der Fertigungsmethode für Batteriezellen mit CID wurde erstellt und getestet.

#### CID-Funktionsprinzip

Ein an einen Napf angeschweißte Membran wird bei Überdruck eingedrückt und der Kontakt reißt ab. Ein weiteres Laden ist danach nicht mehr möglich. Die Schwierigkeiten bei der Auslegung des CID sind:

- Die CID-Einheit muss sicher auslösen bevor die Überdruck-Berstmembran öffnet.
- Zum Auslösen wird ein relativ hoher Druck benötigt, da die Verbindung mittels Schweißpunkte hohe Spitzenströme übertragen können muss.
- Es werden Überladeadditive benötigt, welche bereits im Bereich von 4,3-4,5 V zu hoher Gasung führen. Die Additive beeinflussen jedoch auch die Lebensdauer negativ.

#### b) Zelle mit elektro-pneumatischen Schalter und Widerstand

Bei dieser patentangemeldeten Schaltung schließt eine Membran (106) den Kontakt zwischen 107 und 108. Dadurch wird die Zelle über den Widerstand kurzgeschlossen und kontrolliert entladen. Diese Schaltung verhindert ein unkontrolliertes Überladen einer Zelle mit z.B. Feuer bei hohen Zelltemperaturen, weil die Energie der Batteriezelle bei noch relativ niedrigen Temperaturen verbraucht wird.

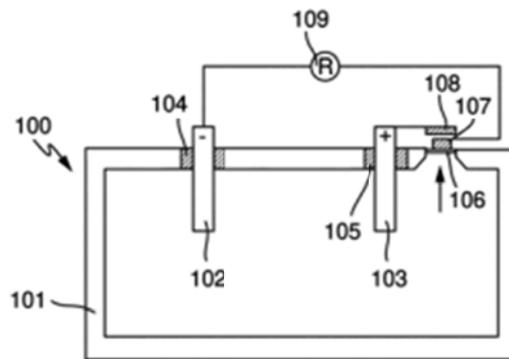


Abbildung 70: Schutzschaltung mit pneumatischem Druckschalter und Widerstand

#### **Weiterarbeit**

Insgesamt wurden hierfür in 2012 ca. 1.000 Forschungsversuchszellen (vgl. Abbildung 71) im PHEV2-Format mit einer Kapazität von min. 32 Ah gebaut. Davon wurden zum Ende des Jahres 350 ausgeprüfte Zellen an VW ausgeliefert. Die Chronik des Zellbaus ist nachfolgend aufgelistet:



Abbildung 71: Forschungsversuchszellen noch ohne Außenisolation

Die weiteren Schwerpunkte waren:

- Konstruktion und Aufbau von Zellen mit CID
- Konstruktion 30-40 Ah PHEV2 Stapelzelle und Bau von Forschungsversuchszellen
- Zusammenfassung der Ergebnisse zu mischen, Pasten- und Elektrodenherstellung, insbesondere auch die Erforschung der Fertigungsmethodik für intermittierende Beschichtung auf dem neuen Coater.

#### **Musterbau von 30-40 Ah prismatischen Zellen mit CID**

Die Konstruktion für den Deckel mit CID wurde zusammen mit dem Hersteller erarbeitet. In aufwendigen Evaluierungsschritten wurden die Halbtteile erforscht und verbessert.

Herausforderungen waren die Abstimmung von:

- Strombelastbarkeit Kontaktnapf → Anzahl und Querschnitt der Schweißpunkte
- Auslösedruck CID → Schweißpunkte und Membrandicke und -form
- Auslösedruck Berstmembran → Membrandicke und Konstruktion

Nachfolgend werden die wichtigen Teile und Prozesse für die erforschte Fertigungsmethodik für PHEV2-Zellen mit CID vorgestellt.



Abbildung 72: Modifizierte Schweißvorrichtung für Laserschweißen von Wickel mit Deckel



Abbildung 73: Zelle mittels Laserschweißung verschließen



Abbildung 74: Fertige Zelle ohne Käfig über der Berstmembran

Im Forschungsprojekt wurde die Wickeltechnologie mit Ableiter-Laserschnitt favorisiert. Diese neu erforschte Technologie brachte für große Zellen erhebliche technologische Vorteile im Vergleich zu den Produktionsverfahren der Wettbewerber.

Vorteile gegenüber bisheriger Wickeltechnologie:

- Höhere Design- und Formflexibilität
- Höhere Kapazität durch bessere Volumenausnutzung – Ableiter werden einseitig, oben herausgeführt
- Homogenere Druckverteilung über die gesamte Elektrodenfläche → Geringeres Risiko der Lithium-Plattierung
- Weniger schockempfindlich wegen besserer Passform im Becher

Vorteile gegenüber Stapeltechnologie:

- Höhere Bearbeitungsgeschwindigkeit
- Präzisere Positionierung der Elektroden und des Separators zueinander
- Erfordert keine intermittierende Beschichtung
- Weniger Schnittkanten, welche die Gefahr von Feinschlüssen verringern

Da jedoch bei den Wickelzellen teilweise Lithium-Plattierung beobachtet wurde, welche insbesondere in den Radien auftritt (s. Abbildung 75), sollten auch Zellen in Stapeltechnologie zum Vergleich aufgebaut werden. Die Ursache für diese Li-Plattierung ist noch unklar, eine mögliche Ursache könnte geringerer Anpressdruck im Radiusbereich sein. Bei Stapelzellen hingegen sind die Drücke über die gesamte Elektrodenoberfläche sehr homogen.

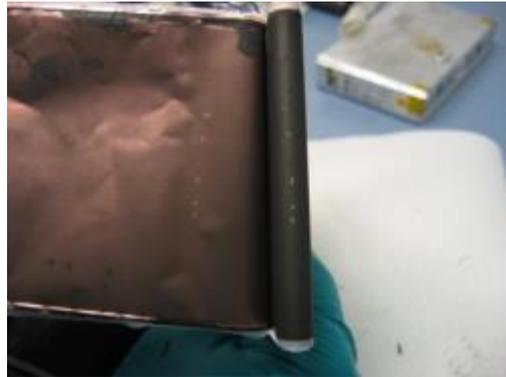


Abbildung 75: Zelle nach 800 Zyklen. Beginn der Lithium-Plattierung auf der Anode

Problematisch ist auch die Haftung der Masse im Radiusbereich, vgl. Abbildung 76.

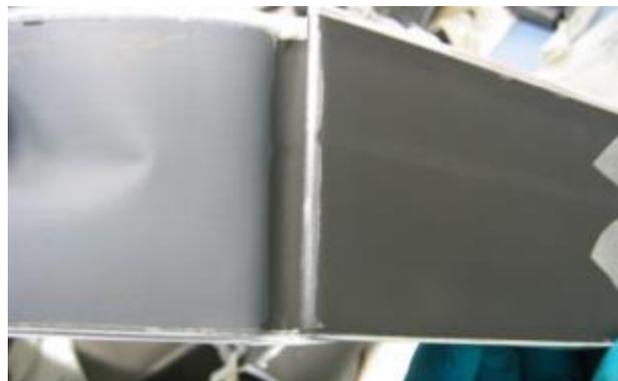


Abbildung 76: Insbesonders im Bereich kleiner Biegeradien besteht das Risiko der partiellen Ablösung der Elektrodenmasse vom Kollektor.

Dem Antrag zur parallelen Erforschung der Fertigungsmethoden für Stapelzellen wurde vom Projektträger stattgegeben. Für die Forschungsarbeiten wurde eine Kooperation einem Hersteller für Stapelmaschinen gestartet. Hierbei sollten neben der Stapeltechnologie auch die Einflüsse des Laserschneidens in die Elektrodenaktivmassen auf die Zellperformance erforscht werden.

Nachfolgend wird die Fertigungsmethode anhand der Abbildung 77 bis Abbildung 80 kurz dargestellt. Die ersten Zellstapel (7 Zellen; Versuchsnummer 02.4b.0003 NMC) wurden beim Maschinenlieferanten hergestellt.

- Stapeldicke: 23,0 mm bis 23,5 mm ; 91 Kathodenblätter
- Stapellänge: 143,8 mm ; 92 Anodenblätter

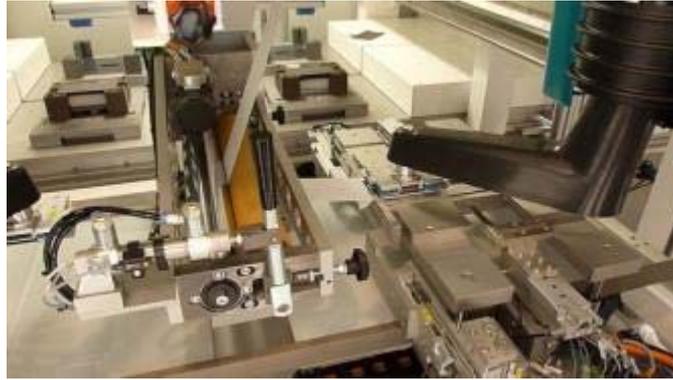


Abbildung 77: Ansicht der Stapelebene der Stapelmaschine mit Zuführung von Separator (links) und Vakuumgreifern mit Elektroden (rechts)

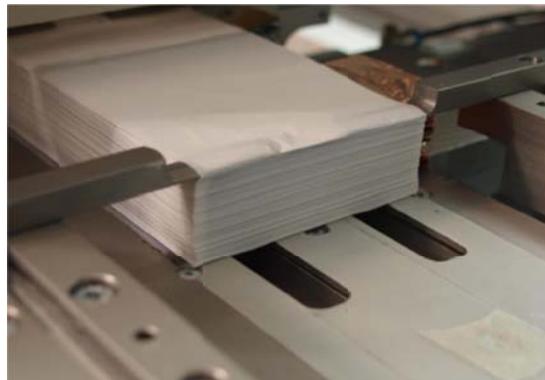


Abbildung 78: Z-Stapel mit 197 Elektroden



Abbildung 79: Ansicht des Bearbeitungszentrums des Lasers mit Vorrichtung zum Verschweißen von Deckel und Gehäuse

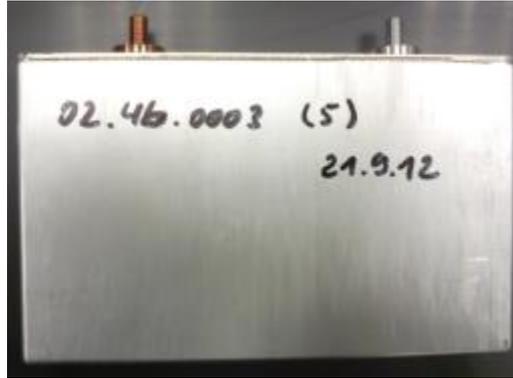


Abbildung 80: Ansicht eines lasergeschweißten Deckels

Die Grundlagen der Fertigungsmethodik beginnen bei der Fertigung der Elektroden. Die Grundlage einer guten Beschichtung ist eine reproduzierbar herstellbare Elektrodenpaste. Die beschafften Mischer eignen sich sehr gut für intensive Knetprozesse und damit für die Herstellung einer reproduzierbaren Paste.



Abbildung 81: Fertige Paste am Mischwerkzeug mit glatter Erscheinung und idealem Abtropfverhalten als Zeichen optimal eingestellter Viskosität

Dafür muss der optimale Feststoffgehalt der Paste in jeder Knetphase bestimmt werden, damit auf der einen Seite ein genügend hohe Viskosität in der Paste vorhanden ist, um Schubspannungen zu induzieren, die die Primäragglomerate beim Kneten zerstören, auf der anderen Seite die Schubspannungen aber nicht zu groß werden und zum Stillstand des Rührwerkes führen. In umfangreichen Versuchen wurden für jede Knetphase die optimalen Feststoffanteile bestimmt. Nach dem intensiven Kneten sind alle Primäragglomerate der Paste aufgelöst. Die Paste hat aber durch die hohen elastischen Anteile Sekundäragglomerate hervorgebracht, die nicht vollständig aufgelöst werden können. Daher wird die Paste nach Einstellung des Zielfeststoffgehaltes in einen zweiten Mischer transferiert. Im zweiten Mischverfahren werden die weichen, elastischen Sekundäragglomerate mit einem Dissolver aufgelöst. Damit wird ein optimales Mischergebnis erzielt, das maschinen- und materialeffizient ist und schonend die Aktivmaterialien bearbeitet.

Die Herstellung von intermittierend beschichteten Bändern ist mit reproduzierbar guter Qualität möglich. Im Zuge der Fixierung der Herstellungsparameter der Elektrodenpasten für Anoden- und Kathodenelektrodenbänder gelang es, die Pasteneigenschaften reproduzierbar einzustellen. Mit reproduzierbaren Pasteneigenschaften, insbesondere der Pastenviskosität, ist es möglich mit sehr hoher Genauigkeit die Einstellungsparameter der Beschichtungen im Voraus festzulegen und ohne signifikante Änderungen für die Herstellung reproduzierbar guter Qualität zu nutzen. Der entscheidende Vorteil ist die Minimierung des Ausschussmaterials und damit die Erhöhung der Material- und Maschineneffizienz. Dabei ist die Herleitung der Zusammenhänge der Beschichtungsparameter aus den Eigenschaften der Paste von zentraler Bedeutung. Dafür sind die

Beherrschung der viskosen und elastischen Eigenschaften der Paste und deren Einstellung der Schlüssel für die hohe Qualität bei intermittierender Beschichtung.

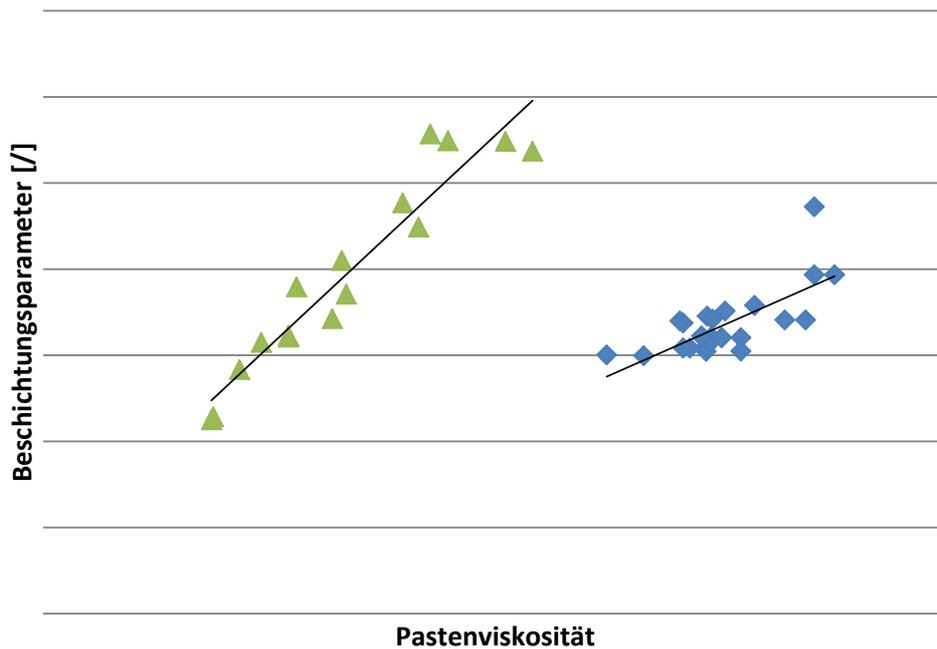


Abbildung 82: Darstellung des Zusammenhanges zwischen der Viskosität bei 25 °C und den qualitätsbestimmenden Beschichtungsparametern für 2 verschiedene Pastenarten

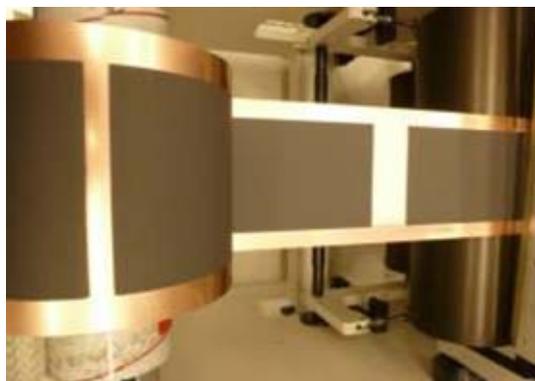


Abbildung 83: Asymmetrische, beidseitige vollflächige, intermittierende Beschichtung auf Kupferfolie

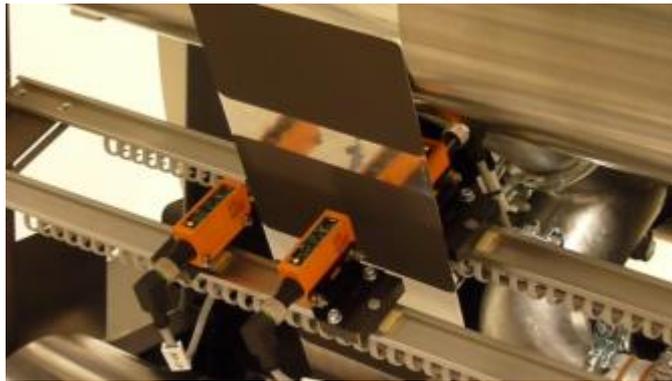


Abbildung 84: Symmetrische, beidseitige vollflächige, intermittierende Beschichtung auf Aluminiumfolie

Als Ergebnis der eingehenden Untersuchung der Pasteneigenschaften und deren Auswirkung auf die Beschichtungsqualität ist es gelungen intermittierende Elektroden für Anoden- und Kathodenanwendungen zu fertigen, die höchsten Ansprüchen in Bezug auf Kantenqualität und Deckungsgleichheit erfüllen. Dies zeigen Abbildung 83 und Abbildung 84. Der direkte Vergleich von 2 Längsprofilen zeigt den Unterschied und ermöglicht die Beurteilung der erfolgreichen Arbeit, wie Abbildung 85 und Abbildung 86 zeigen.

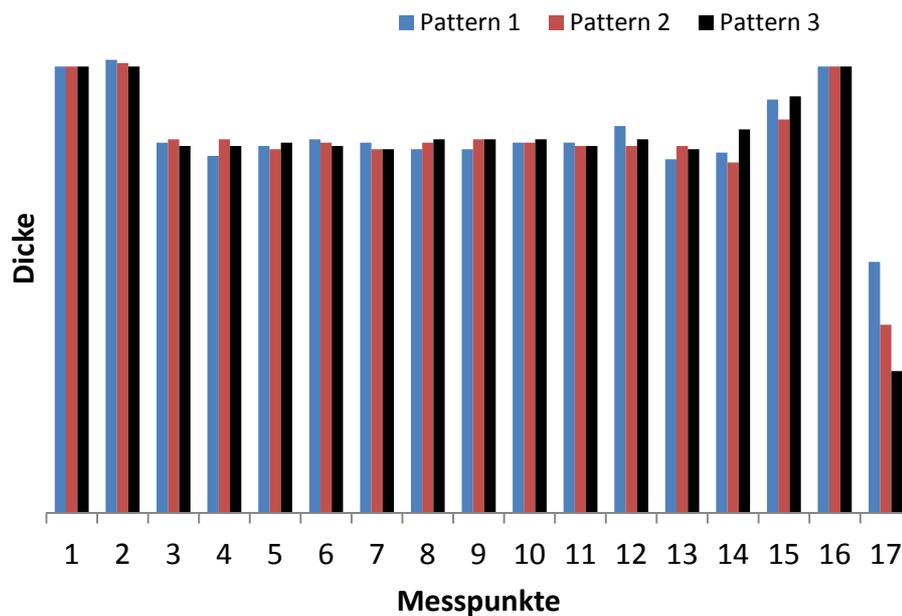


Abbildung 85: Längsprofil entlang des beschichteten Bereiches einer intermittierend beschichteten Elektrode mit Start- und Abrisskantenüberhöhung

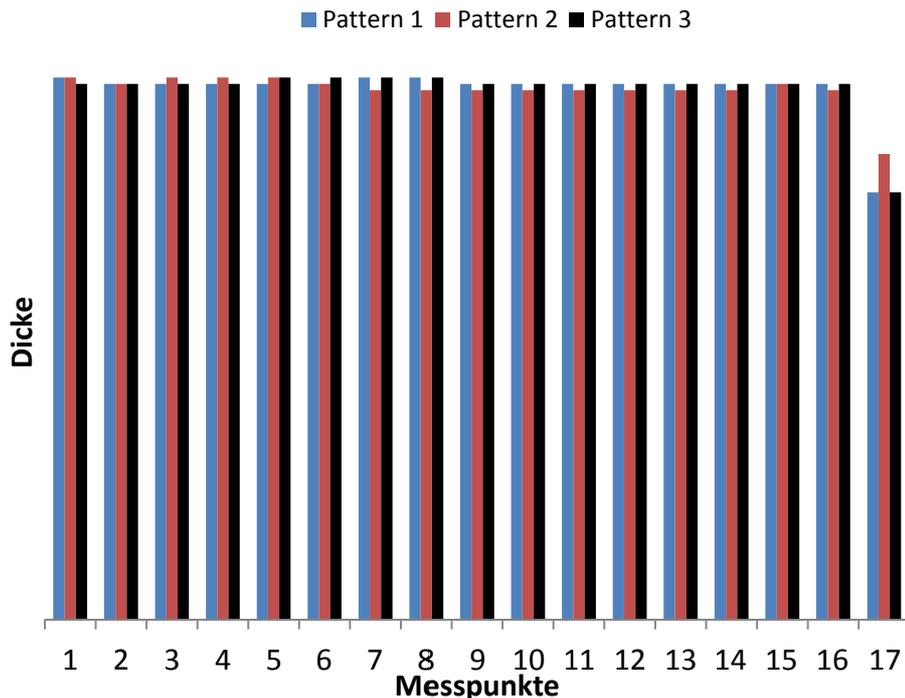


Abbildung 86: Längsprofil entlang des beschichteten Bereiches einer intermittierend beschichteten Elektrode ohne Start- und Abrisskantenüberhöhung

Die größten Herausforderungen in Bezug auf den Prozessschritt des intermittierenden Beschichtens lagen aber wie beim Mischen im Bereich der Lithium-Eisenphosphat-basierten Pasten. Zwei starke Effekte erforderten das Eingreifen im Bereich des Beschichters. Einerseits gab es eine extreme Verschlechterung im Querprofil der Beschichtung mit asymmetrischen Abweichungen von bis zu 20 g/m<sup>2</sup> im mittigen Flächengewicht. Andererseits traten wieder starke Kantenüberhöhungen an der Beschichtungskante der einzelnen Segmente auf. Das erste Problem wurde durch Einstellungen am Trockner deutlich entschärft. Zur Steigerung der Qualität musste die Bahngeschwindigkeit um 30 % angepasst werden. Die Kantenüberhöhungen mussten durch Designänderungen an der Beschichtungsdüse behoben werden. Die beiden Maßnahmenpakete führten zu einer reproduzierbaren Beschichtungsqualität bei LFP-Bändern.

### 2.2.13AP 2.9 – Erarbeitung erster Qualitätssicherungskonzepte

Dauer: 01.07.2010 bis 30.09.2012

Zur Qualitätssicherung wird das APQP Verfahren (Advanced Product Quality Planning) (Abbildung 87) verwendet, das bereits in der Automobilindustrie mit Erfolg eingesetzt wird. Die Produktqualitätsvorausplanung (APQP) ist ein strukturiertes Verfahren zur Definition und Ausführung der Maßnahmen, die erforderlich sind, um sicherzustellen, dass ein Produkt den Anforderungen des Kunden entspricht. Durch APQP entsteht eine Vereinfachung der Kommunikation zwischen allen beteiligten Personen und Sicherstellung, dass alle erforderlichen Schritte termingerecht, zu möglichst geringen Kosten und in der geforderten Qualität fertig gestellt werden. Das APQP verfolgt das Ziel, eine einheitliche produktbezogene Dokumentationsstruktur/-hierarchie zu schaffen, die dafür sorgen soll, dass die notwendige Transparenz über das Herstellgeschehen für den Anwender (Hersteller) ersichtlich wird.

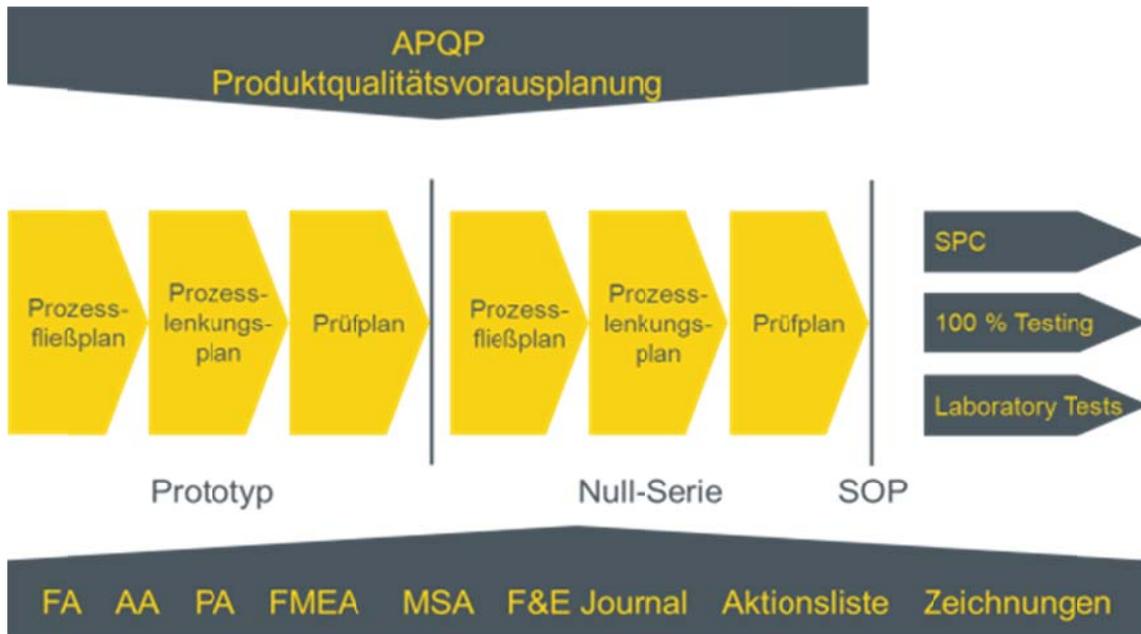


Abbildung 87: Schematische Darstellung des APQP Verfahrens

Die Arbeiten zu diesem Arbeitspaket wurden erfolgreich und fristgerecht abgeschlossen.



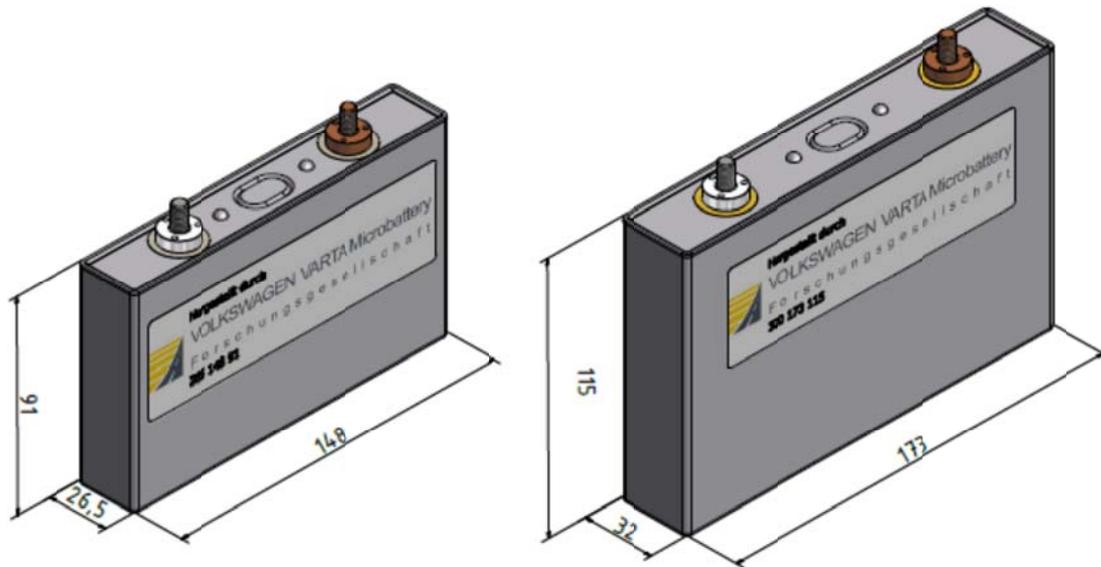


Abbildung 88: 3D-Zeichnungen von 30-40 Ah PHEV2-Zelle und 60 Ah BEV1-Zelle (rechts)

In der nachfolgende Tabelle 9 werden die Hauptunterschiede in der Fertigungsmethodik und den Prozessparameter von 30-40 Ah und 60 Ah Zelle tabellarisch aufgelistet.

Nr.	Prozess	Modifikationen gegenüber prismatische 30-40 Ah-Zelle			
		Anlagen & Werkzeuge	Halbteile	Prozessparameter	
1	Paste Mischen	Anode Kathode	keine keine	keine keine	keine keine
2	Beschichten	Anode	Breitere Beschichtungsdüse erforderlich	keine	Beschichtungsparameter anpassen
		Kathode	Breitere Beschichtungsdüse erforderlich	keine	Beschichtungsparameter anpassen
3	Transport Elektroden-Coils		keine	keine	keine
4	Kalandrieren	Anode	keine	keine	anpassen
		Kathode	keine	keine	anpassen
5	Elektroden Schneiden	Anode	keine	keine	anpassen
		Kathode	keine	keine	anpassen
6	Wickel herstellen		Neues Wickelschwert	Breite von Klebebänder und Separator anpassen	Programm für Maschinensteuerung erstellen
7	Elektroden Schneiden	Anode	keine	keine	anpassen
8	Zellgehäuse vorassemblieren	Becher Vlies schneiden	keine	neues Format	Programm für Trotec-Laser erstellen
		Vlies einlegen	Handvorrichtung	neues Format	keine

Schlussbericht Zuwendungsempfänger  
Förderkennzeichen: 0327889 A

Nr.	Prozess	Modifikationen gegenüber prismatische 30-40 Ah-Zelle			
		Anlagen Werkzeuge	& Halbteile	Prozessparameter	
8	Zellgehäuse vorassemblieren	Deckel Isolierung (PEEK) herstellen	keine	neues Format	Programm für Trotec-Laser erstellen
		Deckel mit PEEK-Folie verkleben	keine	keine	keine
9	Wickel isolieren	Isolationsfolien	Handvorrichtung	neues Format	keine
10	Innere Zellkontaktierung	Polbolzen mit Ableiterblechen verschweißen	Aufnahmen	Neues Poldesign für höhere Ströme	Schweißparameter
		Elektrodenableiter an Kontaktbleche schweißen	Aufnahmen	Neues Ableiterdesign für höhere Ströme	Schweißparameter
11	Wickel mit Deckel trocknen		Aufnahmen	keine	Trocknungsparameter anpassen
12	Wickel mit Deckel in Becher fügen		Handmontagevorrichtung bauen	keine	Prozessparameter ermitteln
13	Zelle verschließen		Aufnahme für Laser	keine	anpassen
14	Vormontierte Zellen nachtrocknen		Aufnahmen	keine	Trocknungsparameter anpassen
15	Zelle mit Elektrolyt befüllen		Aufnahmen für Befüllstation	keine	Prozessparameter erforschen
20	Elektrolytloch mit Ventil verschließen		Aufnahme anpassen	keine	keine
16	Zellen codieren		keine	neue Etiketten	keine
17	Stützplatten montieren		Vorrichtung bauen	größere Platten beschaffen	keine
18	Zelle tempern		Trays anpassen	keine	Prozessparameter erforschen
	Zellen zur Formation transportieren		Trays anpassen	keine	keine
19	Zellen formatieren		Aufnahmen	keine	Prozessparameter erforschen
20	Zelle entgasen, nachbefüllen, verschließen	Entgasen und nachbefüllen	keine	keine	Steuerprogramm anpassen
		Mit Al-Kugel verschließen	keine	keine	Steuerprogramm anpassen
21	Zellenlager (Reifelager)		Lagerkisten anpassen	keine	keine

Nr.	Prozess	Modifikationen gegenüber prismatic 30-40 Ah-Zelle	Anlagen & Werkzeuge	gegenüber Halbteile	prismatische 30-40 Prozessparameter
22	Freigabetests		Zellaufnahmen	keine	Freigabetest definieren
23	Zellenlager nach Freigabe		Lagerkisten anpassen	keine	keine

Tabelle 9: Unterschiede in der Fertigungsmethodik und den Prozessparameter von 30-40 Ah und 60 Ah-Zelle

### 2.3.2 AP 3.2 – Aufbau des Zellmusterbaus für 60 Ah-Zellen auf Basis einer Zellgeometrie und zweier Zellchemiesysteme

#### 2.3.2.1 AP 3.2.1 – Konzeption des Musterbaus für Zellchemie 1

Dauer: 01.10.2011 bis 31.03.2012



Abbildung 89: Teilansicht des Musterbaus mit Handmontagplätzen für 30-40 und 60 Ah-Zellen

Die Arbeiten zu diesem Arbeitspaket wurden abgeschlossen. Schwerpunkt im ersten Quartal 2012 war die Erstellung einer vorläufigen Zellkonstruktion für 60 Ah (Abbildung 90) und die Erstellung eines Konzepts für den Bau der Zellen.

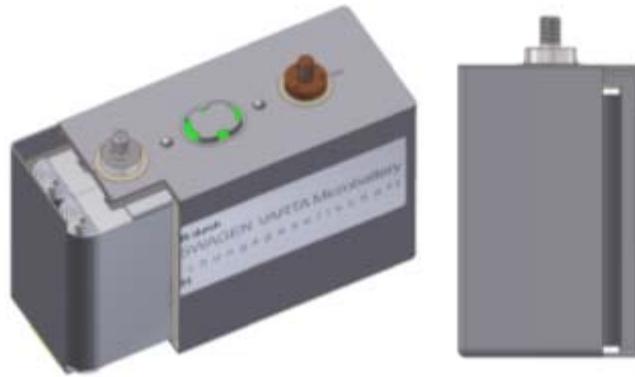


Abbildung 90: Vorläufige Zellkonstruktion 60 Ah Zelle mit den Zellabmessungen: 145,5 mm x 91 mm x 57 mm

Auf Basis der parametrisierten Fertigungsmethodik und Anlagen wurden die Prozesse und Arbeitsschritte spezifiziert und die Mitarbeiter organisatorisch zu den einzelnen Arbeitsschritten zugeteilt.

Die Anlagen und die Arbeitsschritte für den Zellmusterbau 60 Ah Zellen wurden so ausgelegt, dass mit relativ geringen Umrüstzeiten sowohl prismatische Zellen mit 30-40 Ah als auch prismatische 60 Ah Zellen auf den gleichen Anlagen gebaut werden können. Durch den modularen Aufbau werden die Kosten für die Forschungsanlagen reduziert und die Mitarbeiter können sehr effizient eingesetzt werden.

#### **2.3.2.2 AP 3.2.2 – Konzeption des Musterbaus für Zellchemie 2**

Dauer: 01.10.2011 bis 31.03.2012

Die Unterschiede in der Konzeption zur Zellchemie 1 sind bezogen auf die mechanischen Prozessschritte gering. Für den Umgang mit Gefahrstoffen, wie z. B. NMC (Nickel-Mangan-Cobaltoxid) haltigen Materialien wurden die Schutzmaßnahmen und Arbeitsvorschriften entsprechend angepasst.

Auf Basis der parametrisierten Fertigungsmethodik und Anlagen wurden die Prozesse und Arbeitsschritte spezifiziert und die Mitarbeiter organisatorisch zu den einzelnen Arbeitsschritten zugeteilt.

Die Anlagen und die Arbeitsschritte für den Zellmusterbau 60 Ah Zellen für Zellchemie 2 unterscheiden sich nur in den Rezepturen und der Herstellung der Elektroden. Die Konzeption des Musterbaus ist gleich zu AP 3.2.1. und wird deshalb hier nicht weiter beschrieben.

#### **2.3.3 AP 3.3 – Anpassung der Versuchsanlagen (Formatänderung und erhöhte Sicherheitsanforderungen) für 60 Ah-Zellen**

Dauer: 01.01.2012 bis 30.09.2012

Wegen des hohen Energieinhaltes von 60 Ah-Zellen (ca. 240 Wh pro Zelle) mussten hier beim Bau, der Formation, dem Test und der Lagerung der Zellen weitere Sicherheitsvorkehrungen getroffen werden. Die Formationsanlage wurde mit einer Einhausung versehen (Abbildung 91). Jede Kabine wird mit maximal 5 Stück 60 Ah Zellen bestückt. Jede Kabine ist mit einem Abluftrohr und einer Kohlendioxidlöschanlage versehen (Abbildung 92).



Abbildung 91: Formationsanlage mit Sicherheitskabinen



Abbildung 92: Gasversorgung der Kohlendioxidlöschanlage

Die Arbeiten zu diesem Arbeitspaket wurden erfolgreich und fristgerecht abgeschlossen.

#### **Prozesse des Zellmusterbaus für 60 Ah Zellen**

Basis der Konstruktion sind 2 x 30 Ah Wickel. Als Gehäuse wurde ein Format mit den Abmessungen L=173,6 x H=91 mm x B=47,5 mm beschafft. Dieses Format ist etwas kleiner als das von der VDA normierte BEV2 Gehäuse für 60 Ah-Zellen mit den Abmessungen L=173 mm x H=91 mm x B=45 mm. Nachfolgend werden die Prozesse des Zellmusterbaus kurz beschrieben.



Abbildung 93: Lasergeschweißte Deckel mit Becher vor der Elektrolytbefüllung

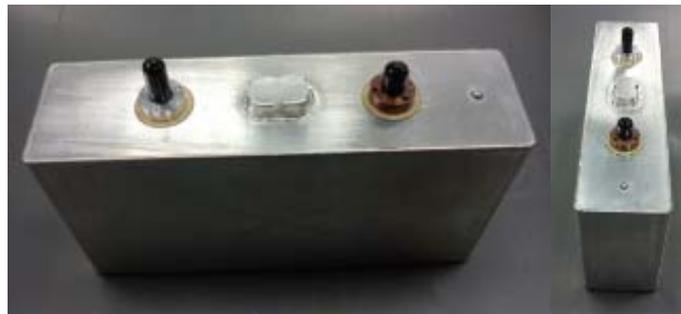


Abbildung 94: 60 Ah-Zelle nach Endverschluss

#### **Prozess Zelltempern für 60 Ah Zellen**

Beim Tempern der Zellen bestand die Gefahr, dass sich durch austretenden Elektrolyt im Temperierschrank ein zündfähiges Gemisch bildet, wenn die Zellen undicht sind. Die bei dem Elektrolyten verwendeten Lösungsmittel (Ethylencarbonat, Dimethylcarbonat, Diethylcarbonat, Ethylmethylcarbonat) bilden ab einer bestimmten Konzentration zündfähige Gemische. Diese Gefahr steigt mit zunehmender Zellgröße, da die vorhandene Elektrolytmenge zunimmt. Um zündfähige Gemische zu detektieren, wurden spezielle Sensoren eingebaut (Abbildung 95).



Abbildung 95: Detektor

Sobald der Detektor organische Substanzen misst, wird die Abluftanlage gestartet. Diese Maßnahme garantiert, dass die Konzentration von Lösungsmitteln unter der unteren Explosionsgrenze bleibt. Das Signal der Warnlampe zeigt an, dass der Wärmeschrank momentan nicht geöffnet werden darf. Somit wird garantiert, dass kein Mitarbeiter giftige Elektrolytdämpfe einatmet, oder durch eine beim Öffnen des Schrankes ausgelöste Explosion gefährdet wird. Da die 60 Ah-Zellen ein erhöhtes Gefahrenpotenzial haben, wurden die für die Zyklisierung vorgesehenen Kabinen mit Rauchgassensoren und einer Abluftanlage ausgerüstet (Abbildung 96). Sobald Rauchgas detektiert wird, wird automatisch die Feuerwehr alarmiert und parallel das Rauchgas abgesaugt, was ein Übergreifen des Brandes auf benachbarte Kabinen verhindert. Zudem wird durch die Absaugung eine Kontamination des Formationsraumes mit giftigem Kathodenmaterial oder dem ebenfalls als toxisch eingestuftem Elektrolyt verhindert.



Abbildung 96: Rauchgassensor und Abluftrohr

### **Zellentest im Prüffeld**

Im Prüffeld wurden die mechanischen Anschlüsse und die Parameter der elektrischen Tests für die 60 Ah Zellen angepasst; Abbildung 97.



Abbildung 97: 60 Ah-Zellen im Lade- und Entladetest in Sicherheits-Thermoschränken und mit angeschlossener Zyklenanlage

### **Sicherheitstests (Nageltest)**

Der Nageltest einer 60 Ah-Zelle zeigte die von der Zelle ausgehende potentielle Gefahr. Der eindringende Nagel verursachte einen massiven internen Kurzschluss, bei dem die gesamte gespeicherte elektrische Energie in Wärme umgesetzt wird. Der Test ist wesentlich kritischer für die Zelle als ein externer Kurzschluss, bei dem ein Teil der Energie in dem externen Widerstand - im Test ein Shunt - abgebaut wird. Die Zelle erhitze sich beim Nageltest bis auf 450°C. Im Diagramm (Abbildung 98) ist der Verlauf der Zellspannung und die Temperatur am Minuspol, Pluspol, Zelloberfläche, Spannplattenoberfläche und Nagel dargestellt. Die Spannung bricht nach Eindringen des Nagels sofort zusammen. In wenigen Sekunden erhitze sich die Zelle auf über 400°C. Der verdampfende Elektrolyt erzeugt einen hohen Druck, wodurch die Berstmembran geöffnet wird. Der austretende Elektrolytdampf wird durch pyrophore Anodenteilchen, die sich bei Kontakt mit der Luft entzünden, gezündet (Abbildung 99). Es bildet sich eine Stichflamme aus. Durch die entstehende Hitze wurde die Sicherheitsglasscheibe der Sicherheitsbox zerstört (Abbildung 100). Die 60-Ah-Zelle stellt offensichtlich eine Gefahr für alle Mitarbeiter, die mit der Zelle hantieren, dar.

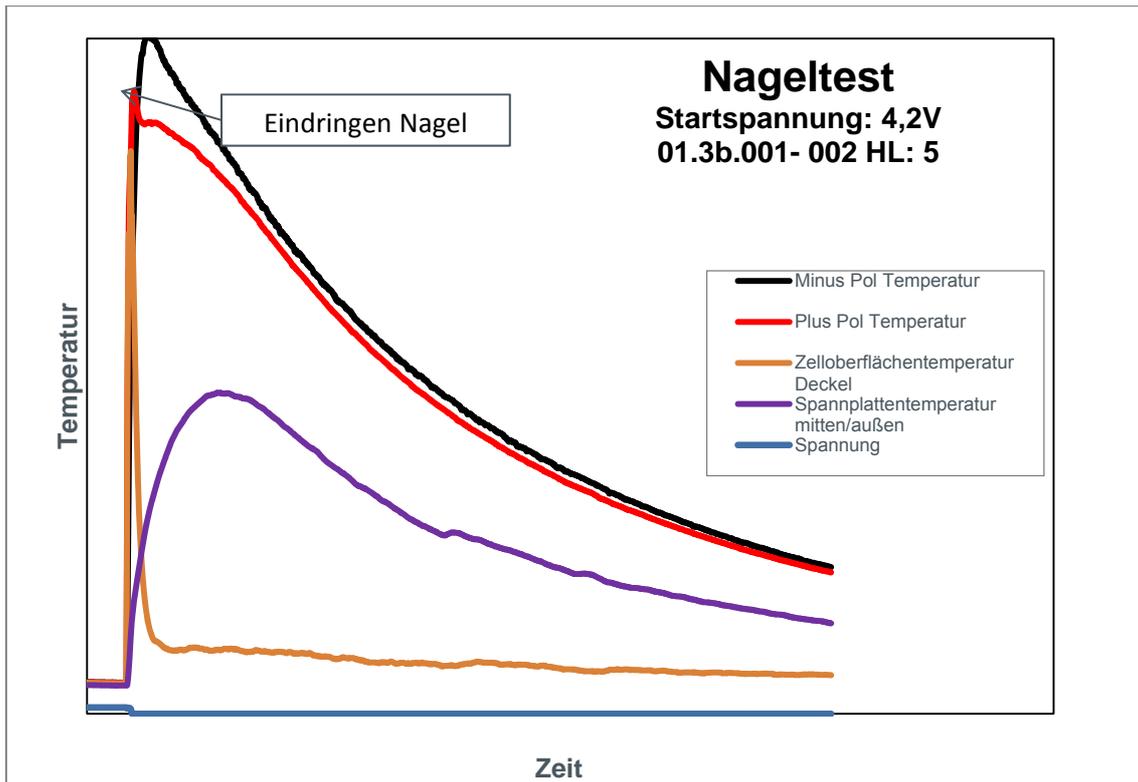


Abbildung 98: Diagramm über den Nageltest einer 60-Ah-Zelle



Abbildung 99: Nageltest einer 60-Ah-Zelle mit starker Rauch und Feuerentwicklung



Abbildung 100: Sicherheitsglasscheibe nach dem Nageltest der 60 Ah Zelle

### **Empfehlung für Weiterarbeit**

Aufgrund der hohen Gefährdung durch die 60-Ah-Zellen wurde in Abstimmung mit den Projektpartnern empfohlen, dass nur noch 30-40 Ah Zellen im PHEV2-Format weiter bearbeitet werden sollen.

Die Änderungen betreffen primär nur das AP 3, wobei die Arbeitspakete AP 3.5, AP 3.6 und AP 3.6.1 teilweise vorgezogen wurden, um die Gefährdungspotentiale von 60-Ah-Zellen zum Schutz der Nutzer, Mitarbeiter und der Umwelt so früh wie möglich einschätzen zu können.

Für das AP 4 wurde die Skalierbarkeit der erforschten Fertigungsmethode am Beispiel der 30-40 Ah PHEV2 nachgewiesen.

### **2.3.4 AP 3.4 Inbetriebnahme der angepassten Versuchsanlagen**

Dauer: 01.07.2012 bis 31.03.2013

Die mit zusätzlicher Sicherheitstechnik versehenen Versuchsanlagen (Abbildung 101 und Abbildung 102) wurden in Betrieb genommen.



Abbildung 101: Temperierschränke mit Lösungsmittelsensoren und Abluftanlage



Abbildung 102: Formations- und Zykelpplätze mit Rauchgassensoren und Abluftanlage

Alle Maschinen, modifizierten Anlagen und Vorrichtungen konnten erfolgreich und termingerecht in Betrieb genommen werden und sind einsatzbereit. Zur Herstellung von 60 Ah-Forschungsversuchszellen sind die folgenden Prozessschritte und deren zugehörige Maschinen und Anlagen zu modifizieren gewesen:

- Herstellung von Wickeln auf der Wickelmaschine
- Pressen der Wickel an der Labortischpresse
- Trimmen der Ableiter
- Schweißen der Ableiterbündel
- Schweißen der Ableiterbündel an die Polplatte
- Montage der Deckel an die Wickel
- Trocknen der Wickel
- Montage der Deckel-Wickel-Einheit in den Becher
- Verschließen der Becher durch Verschweißen der Deckel
- Aktivieren der Zellen in der Elektrolyt-Befüllungsanlage

Die Abnahme und Freigabe der modifizierten Maschinen wurde anhand der Herstellung einer geringen Stückzahl von 60 Ah-Forschungsversuchszellen durchgeführt. Das Ergebnis waren, wie in Abbildung 103 gezeigt, voll funktionsfähige Li-Ionen-Zellen, die den weiteren Tests unter anderem den Sicherheitstests zugeführt werden konnten.



Abbildung 103: Hergestellte 60 Ah-Forschungsversuchszellen zur Abnahme und Freigabe der modifizierten Forschungsversuchsanlagen

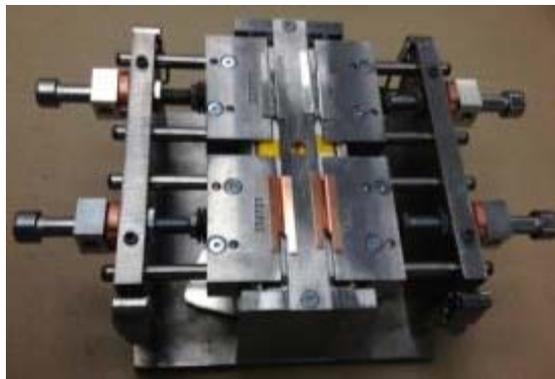


Abbildung 104: Schweißvorrichtung für die Verbindung der Ableiterbündel mit den Polplatten

Der Prozessschritt „Verbinden der Ableiterbündel mit den Polplatten“ der Forschungsversuchsfertigung der 60 Ah-Zellen ist in Abbildung 104 beispielhaft dargestellt. Das Ergebnis sind repräsentative Zellen, die generelle Aussagen zu diesem Zellformat zulassen.

Die Sicherheitstests mit den diesen 60 Ah-Zellen zeigten ein enormes Schadenspotential. Auf Empfehlung der Geschäftsführung wurde der Projektträger im November 2012 informiert, dass die Arbeiten an der 60 Ah-Forschungsversuchszelle eingestellt werden sollten. Daher wurde die Inbetriebnahmephase dieses Arbeitspaketes früher beendet als ursprünglich geplant.

### **2.3.5 AP 3.5 Einfahren der angepassten Versuchsanlagen**

Dauer: 01.01.2013 bis 30.06.2013

Die Sicherheitstests mit den 60 Ah-Forschungsversuchszellen zeigten ein enormes Schadenspotential. Auf Empfehlung der Geschäftsführung wurde der Projektträger im November 2012 informiert, dass die Arbeiten an der 60 Ah-Forschungsversuchszelle eingestellt werden sollten. Daher wurde dieses Arbeitspaket nicht bearbeitet. Stattdessen wird in den folgenden Abschnitten die weiterführende Bearbeitung der Zellformate 30 – 40 Ah- diskutiert.

### 2.3.6 AP 3.6 Musterbau von 30-40 Ah-Forschungsversuchs-Zellen (60 Ah Zell-Konzept)

Dauer: 01.04.2013 bis 30.09.2013

#### 2.3.6.1 AP 3.6.1 Musterbau von 30-40 Ah-Forschungsversuchs-Zellen mit Zellchemie 1 (60 Ah Zell-Konzept)

Dauer: 01.04.2013 bis 30.09.2013

Durch die Einstellung der Arbeiten am Format der 60 Ah-Forschungsversuchszelle infolge der Ergebnisse des Sicherheitstest, wie in Abbildung 105 gezeigt, wurden die Arbeiten am Format der 30 – 40 Ah-Zellen vertieft.



Abbildung 105: Beispiel einer 60 Ah-Forschungsversuchszelle im fertigen Zustand (links) und Auswirkungen des Nageltest einer 60 Ah-Forschungsversuchszelle (rechts).

Damit ergab sich ein zeitlicher Spielraum, in dem das Trimmen der Ableiter in einem qualitativ gesteigerten Werdegang des Schneidprozesses weiter untersucht werden konnte. Das Trimmen der Ableiterbündel der Elektrodenwickel ist ein wichtiger Fertigungsprozess, da alle Ableiter zur guten elektrischen Kontaktierung und zur Vermeidung von Kurzschlüssen einheitlich auf einer Höhe gerade abgeschnitten werden müssen.

Bedingt durch das Zusammenführen der Ableiterfahnen in der Mitte des Wickels ergibt sich eine parabelförmige Verteilung der Ableiterhöhen. Bisher wurden die Ableiterfahnen mit einer Zange händisch über mehrere Schnitte auf Länge geschnitten. Beim Schneiden der Ableiter ist eine Länge von 25 mm zu schneiden, jedoch konnte kein Standard-Handwerkzeug mit ausreichender Schnittqualität für die gesamte Breite beschafft werden.

Die Probleme, die bei der Verwendung der Zange auftreten, sind zum Beispiel ein Versatz, wie in Abbildung 106 zu sehen ist. Bedingt durch den enormen Kraftaufwand und dem unsauberen Abquetschen der Materialien können „Flitter“ entstehen, welche später in der Zelle einen Kurzschluss verursachen.



Abbildung 106: Versatz der Einzelschnitthöhen bei Verwendung der Zange.

Zur Steigerung der Schnittkantenqualität und zur Minimierung des Kraftaufwandes für den Mitarbeiter wurde ein pneumatisch angetriebenes Schnittwerkzeug konstruiert und gefertigt, welches in Abbildung 107 dargestellt ist.



Abbildung 107: Gesamtansicht der pneumatischen Trimm-Vorrichtung für Ableiterbündel.



Abbildung 108: Detailaufnahme der Absaugvorrichtung an der pneumatischen Trimm-Vorrichtung

Die Vorteile der pneumatisch betriebenen Trimm-Vorrichtung sind z.B. ein ergonomisches Arbeiten, eine kürzere Bearbeitungszeit, eine Verbesserung der Schnittqualität und die Reduzierung des Risikos von „Flitterbildung“. Eine integrierte Absaugvorrichtung entfernt die entstehende Schnittgrate zusammen mit den abgeschnittenen Abfallstücken, wie in Abbildung 108 zu sehen ist.

In der Schnitvorrichtung entsteht ein gratfreies Ableiterbündel mit einer einheitlichen Ableiterhöhe, die eine qualitativ hochwertige Weiterverarbeitung der Wickel ermöglicht. Abbildung 109 zeigt das hochwertige Schnittergebnis der installierten Apparatur.



Abbildung 109: Detailaufnahme vom einwandfreien Schnittergebnis der pneumatischen Trimm-Vorrichtung

Der Musterbauprozess in der jetzigen Darstellung umfasst die folgenden Prozessschritte:

- Herstellung der Pasten
- Herstellung der Beschichtungen
- Durchführung der Kalandrierung
- Durchführung der Schneidoperationen
- Herstellung von Wickeln auf der Wickelmaschine
- Pressen der Wickel an der Labortischpresse
- Trimmen der Ableiter
- Schweißen der Ableiterbündel mit C-Blechen
- Schweißen der Ableiterbündel an die Polplatte
- Montage der Deckel an die Wickel
- Trocknen der Wickel
- Montage der Deckel-Wickel-Einheit in den Becher
- Verschließen der Becher durch Verschweißen der Deckel
- Aktivieren der Zellen

Durch die Einstellung der Arbeiten am Format der 60 Ah-Forschungsversuchszelle wurden die Arbeiten am Format der 30 – 40 Ah-Zellen vertieft. Der Fokus lag daher auf 2 Schwerpunkten:

- die Verbesserung der Montage der Wickel durch Weiterentwicklung der Montagevorrichtungen.
- Erhöhung der spezifischen Energiedichte der Zelle durch Designänderungen des Wickels und des Gehäuses.

Beide Maßnahmen dienen der Vorbereitung der Kampagne zum Bau einer größeren Stückzahl von Forschungsversuchszellen für Volkswagen. Die Apparatur mit Schlüsselcharakter ist die Halterung des fertigen Wickels. Diese wird zum Fixieren während des Schneidprozesses für die Ableiterbündel und für den Schweißprozess notwendig.

Der Elektrodenwickel wird an der Wickelmaschine mit senkrecht herausstehenden Ableiterfahnen hergestellt. Im ersten Arbeitsschritt werden die Ableiterfahnen in der Mitte des Wickels zusammengeführt und gemeinsam auf eine definierte Länge geschnitten.

Anschließend werden die in einer Vorrichtung zugeschnittenen Ableiterfahnen des Wickels zwischen sogenannten C-Blechen spaltfrei gespannt. Die C-Bleche werden anschließend mit einem Laser mit dem Batteriepol verschweißt. Die Ableiterfahnen sind nun zwischen den C-Blechen geklemmt.

Im nächsten Arbeitsschritt werden die Ableiterfahnen mit den C-Blechen verschweißt. In diesem Schritt wird der eigentliche stoffschlüssige Kontakt der inneren Wickelung mit den äußeren Batteriekontakten hergestellt. Bei diesem Herstellungsvorgang gibt es 2 potentielle Quellen für erhöhten Ausschuss, wie nachfolgend erläutert wird.

Auf Grund der Zellkonstruktion ist der Platz, der zur Kontaktierung des Elektrodenwickels mit dem Batteriepol zur Verfügung steht, sehr begrenzt. Im ersten Arbeitsschritt wurden bisher die Ableiterfahnen des Elektrodenwickels mit einer speziell zu geschliffenen Zange im fixierten Zustand

bündig abgeschnitten. Hierbei ist eine sehr hohe manuell aufzubringende Schneidkraft erforderlich. Ebenfalls ist die Schnittbreite der Zange sehr gering und erfordert mehrfache Schnitte hintereinander. Dies birgt die Gefahr von Metallspänen im Wickel und ungleichmäßigen Schnittlängen.

Beim Anschweißen der C-Bleche an den Anoden-Batteriepol müssen die Ableiterfahnen geklemmt werden, um im Folgeprozess ein optimales Schweißergebnis zu erhalten. Da Kupfer den größten Teil der Laserstrahlung reflektiert und der benutzte Laser eine geringe Leistung hat, muss die Vorschubgeschwindigkeit beim Schweißen sehr gering sein. Daher kommt es zu einem hohen Eintrag von Wärme, was dazu führen kann, dass der Separator des Elektrodenwickels zerstört wird.

Beim Schweißprozess können Perlen von flüssigem Kupfer entstehen. Diese Schweißperlen könnten in den Wickel gelangen und dort erstarren. Diese Metallkügelchen erzeugen im Wickel Druckspitzen, die im Betrieb der Zelle den Separator durchdrücken und dann Kurzschlüsse erzeugen. Ein beispielhaftes Schadensbild ist in Abbildung 110 zu sehen.



Abbildung 110: Abdrücke von Schweißperlen auf der Elektrodenoberfläche

Qualitätsbedingt werden die Elektrodenwickel gepresst und dürfen nur wenige Minuten ohne Stahlplatten, welche den Elektrodenwickel unter Spannung halten, gehandhabt werden. Da für den Assemblierungsprozess mehrere Vorrichtungen verwendet werden, müssen die Elektrodenwickel mehrmals ein- und ausgespannt werden. Dieses mehrmalige Ein- und Ausspannen kann zu Beschädigungen am Separator führen und ist für die Erzielung von reproduzierbarer Qualität nicht akzeptabel.

Die Lösung war die Kombination der Schneid- und Schweißvorrichtung in einer Konstruktion. Der Elektrodenwickel wird zu Beginn der Assemblierung in eine Vorrichtung eingelegt, in welcher der Elektrodenwickel während der ganzen Bearbeitung verbleibt. Durch die Vorrichtung werden die Ableiterfahnen in der Mitte des Wickels zusammengeführt und dann von einer pneumatisch angetriebenen Schneidvorrichtung auf eine Länge gebracht. Die geschlossene Bauart der Vorrichtung verhindert das Eindringen von Metallspänen. Die Schneidvorrichtung ermöglicht den Zuschnitt über die gesamte Breite der Ableiter.

Der Wickel ist in der Vorrichtung durch Edelstahlbleche vor Wärmestrahlung geschützt, so wird der Wickel beim Schweißen nicht zerstört. Durch die Vorrichtung wird der Wickel und die C-Bleche geführt und ausgerichtet. Da die Vorrichtung dicht um den Elektrodenwickel abschließt, werden eventuell entstehende Schweißperlen von der Vorrichtung abgehalten und können nicht in das Innere des Wickels gelangen. Dies bringt neben den qualitativen Vorteilen auch einen Effizienzvorteil beim Bau von großen Stückzahlen in reproduzierbarer Qualität.

[zusätzliches AP zur Diskussion der Variante TYP 04 Typ 05 mit höhere Energiedichte]

Dieses Arbeitspaket wurde fristgerecht abgeschlossen.

### **2.3.6.2 AP 3.6.2 Musterbau von 30-40 Ah-Forschungsversuchs-Zellen mit Zellchemie 2 (30 Ah Zell-Konzept)**

Dauer: 01.04.2013 bis 30.09.2013

Der Fokus lag auf der Steigerung der Reproduzierbarkeit der Querprofile der anspruchsvollen LFP-Beschichtung.

Die nachfolgenden Ausführungen beschreiben die resultierenden Querprofile einer repräsentativen Probe des beschichteten Bandes. Jeder Balken der nachfolgenden Abbildungen von Abbildung 111 bis Abbildung 116 entspricht einem Dickenmesswert, der mit einer Bügelmessschraube ermittelt wurde. Die Messpunkte liegen 5 mm auseinander. Jede Farbe entspricht jeweils einem vollständigen gemessenen Querprofil im Abstand von einem Meter.

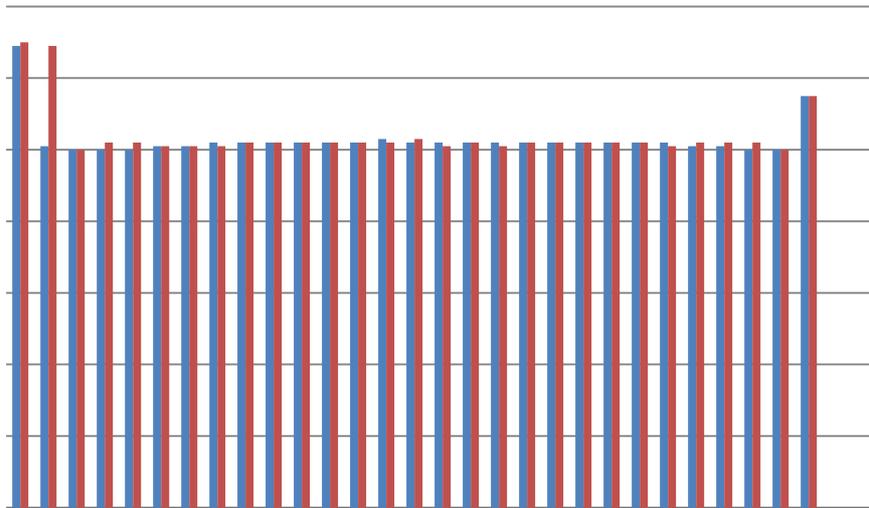


Abbildung 111: Querprofil einer LFP-Beschichtung mit Kantenüberhöhung

Die Ausgangssituation der Querprofiloptimierung ist das in Abbildung 111 dargestellte Querprofil mit starker Seitenkantenüberhöhung. Diese Überhöhung zeichnet sich dadurch aus, dass sie auf den letzten 2 – 3 mm zur Kante schlagartig um 10 – 20  $\mu\text{m}$  höher als der Rest der Beschichtung nach oben schießt. Ursache sind starke elastische Spannungen in der Paste, die sich direkt am Austritt aus der Düse entspannen. Die Folge dieser Entspannung sind Materialanhäufungen am Rand, die sich auf Grund der starken scherverdünnenden Eigenschaften der Paste nicht mehr egalisieren können und somit so antrocknen. Als Folge treten schon nach wenigen Umdrehungen am Aufwickler Brüche im Material auf, die letztendlich zum Abreißen der Folie führen, wie in Abbildung 112 dargestellt.

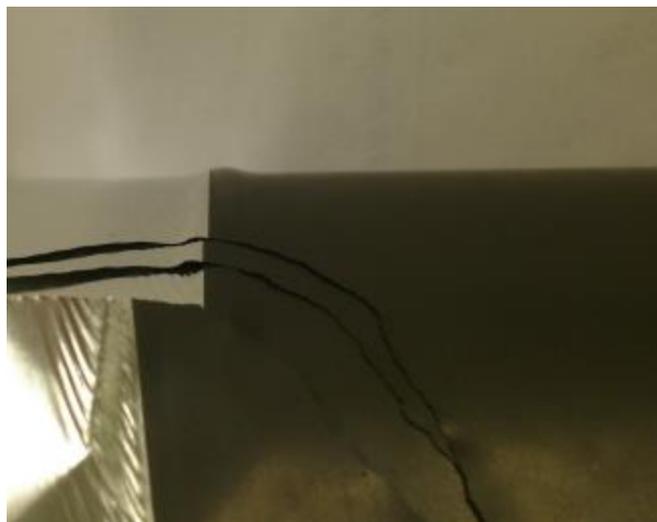


Abbildung 112: Schadensbild einer Kantenüberhöhung beim Aufwickeln am Beschichter

Als Gegenmaßnahme wurden Modifikationen in den Seitenplatten der Düse eingebracht, die die Schubspannungen in der Paste ausklingen lassen sollen. Um ein Gefühl für das Maß der Modifikationsmaßnahmen zu bekommen, wurde mit einem willkürlichen Wert begonnen, der das Querprofil in Abbildung 113 zur Folge hatte. Es ist deutlich zu erkennen, dass der Eingriff in die Düse etwas zu stark war, da zwar die Kantenüberhöhungen vollständig verschwunden sind, aber die Flanken zum Rand hin stark abfallen. Ebenfalls gibt es in der Mitte des Querprofils

Interferenzerscheinungen der reflektierten Elastizitätswellen. Der nächste Schritt der Optimierung nimmt die Modifikation etwas zurück.

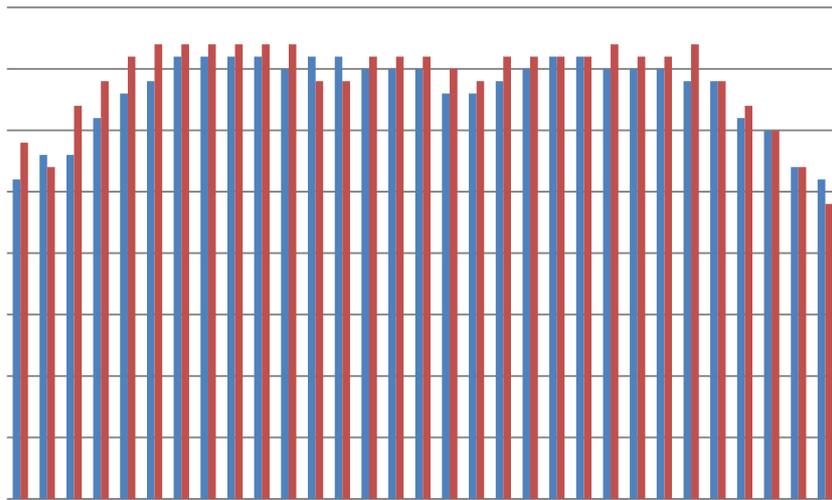


Abbildung 113: Querprofil einer LFP-Beschichtung ohne Kantenüberhöhung

Abbildung 114 zeigt eindeutig, dass die Rücknahme der Entspannungsmaßnahmen in die richtige Richtung geht aber etwas zu stark war. Die Kantenüberhöhung ist wieder aufgetreten. Positiv ist aber, dass sie nicht mehr so gravierend wie in Abbildung 111 auftritt. Es ist gelungen mit dieser Maßnahme die Kantenüberhöhung annähernd auf die Höhe der Gesamtschicht zurückzudrängen und gleichzeitig die abfallenden Flanken wieder anzuheben. Es scheinen zwei gegenläufige Trends bei dieser Art der Düsenmodifikation aufzutreten. Die Wahl der Modifikation muss einen weiteren Freiheitsgrad erhalten, da sonst nur auf dem linken oder rechten aufsteigenden Ast das Optimum verlassen wird. Der rechte aufsteigende Ast führt zu einem weiteren Anwachsen der Kantenüberhöhung und der linke aufsteigende Ast führt zu einem starken Abfallen der Flanken. Dies ist deutlich daran zu erkennen, dass das Abfallen der Flanken schon beginnt, obwohl noch Reste der Kantenüberhöhung vorhanden sind.

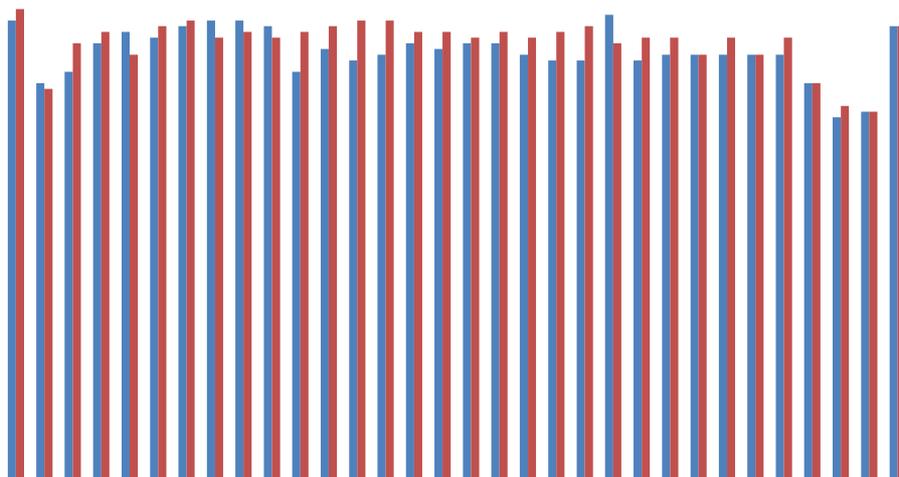


Abbildung 114: Querprofil einer LFP-Beschichtung mit geringer Kantenüberhöhung

Das Mittel der Wahl ist eine weitere konstruktive Modifikation der Seitenplatten in der Düse etwas weiter stromaufwärts der Paste. Hierbei wird ein weiterer Freiheitsgrad geschaffen ohne das bestehende Optimum aus Abbildung 114 zu verschieben.

Das Einbringen der zweiten konstruktiven Änderung in den Strömungskanal der Paste führte zu einer weiteren deutlichen Verbesserung des Querprofils wie in Abbildung 115 gezeigt.

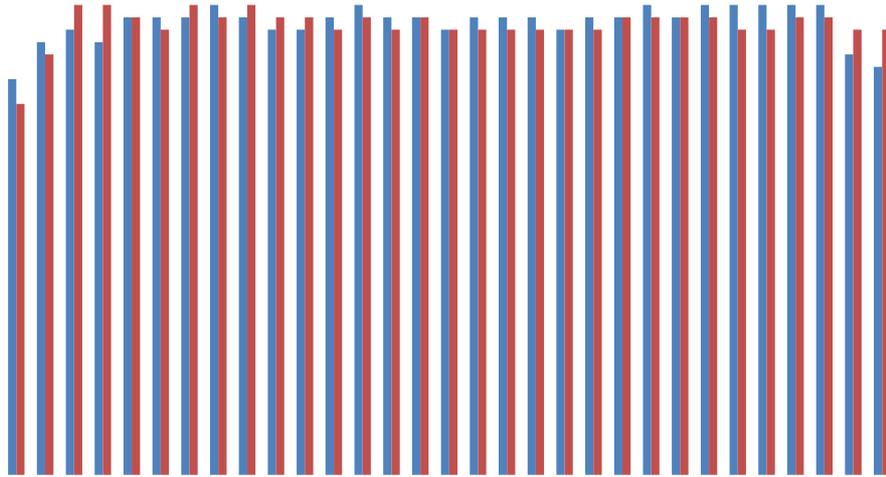


Abbildung 115: Querprofil einer LFP-Beschichtung mit minimal abfallenden Kanten

Die weitere Optimierung der zweiten konstruktiven Änderung in die zufällig richtige Richtung, führte zu dem optimalen Ergebnis wie es Abbildung 116 zeigt. Die Schwankungen beruhen lediglich auf den Messungenauigkeiten, die sich aus der Messung von Rauigkeiten der Oberfläche ergeben. Das Querprofil ist nahezu rechteckig.

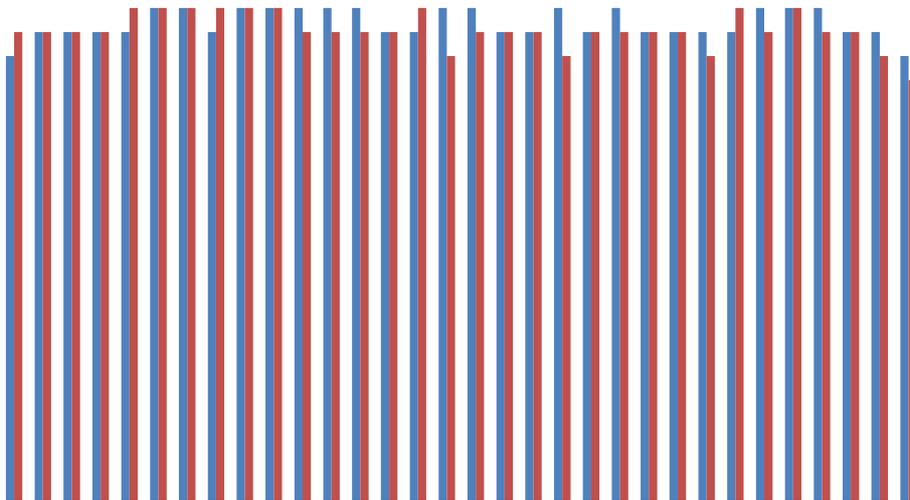


Abbildung 116: Querprofil einer LFP-Beschichtung mit optimalen Kanten

Diese Form des Querprofils führt zu optimalen Ergebnissen in den nachfolgenden Prozessschritten. Besonders beim Kalandrieren wirken sich Abweichungen im Querprofil deutlich auf das Ergebnis aus. Jede Abweichung von der idealen Querprofilstärke erzeugt lokale Verwerfungen, die als Falten sichtbar werden. Die hohe Qualität, die Abbildung 117 zeigt, ergibt sich aus dem idealen Verlauf des Querprofils dank der erfolgreichen Modifikation des Düsenkanals.

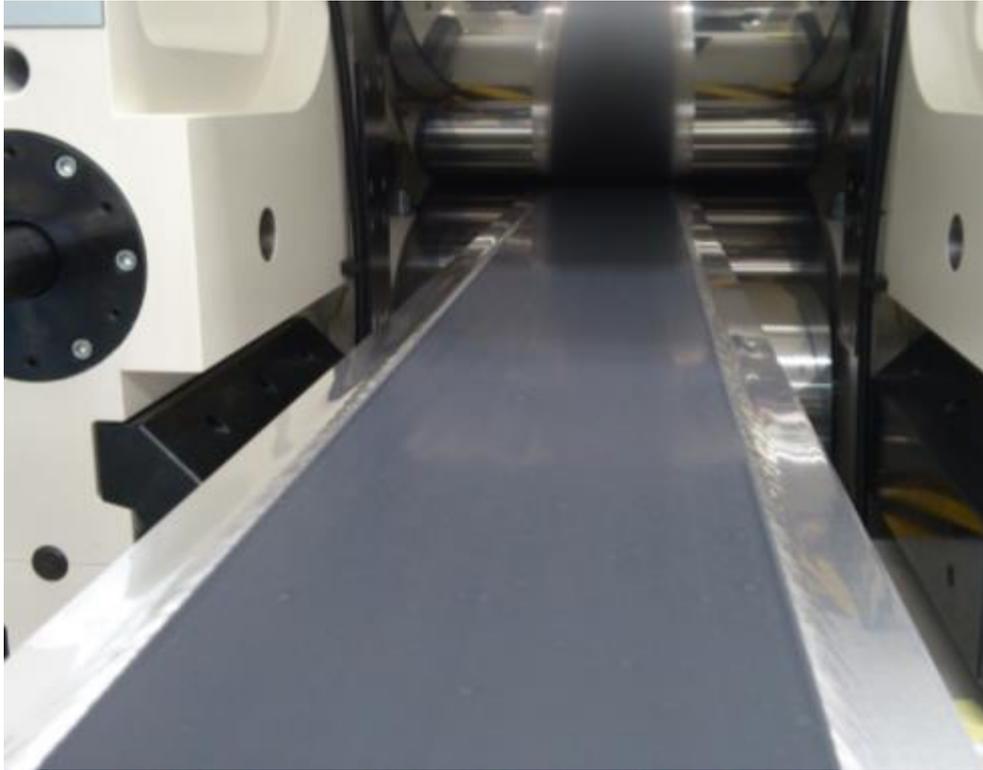


Abbildung 117: Qualität der kalandrierten LFP-Elektrode mit optimalem Querprofil

Parallel zu den Problemlösungen der Beschichtungskomponenten erfolgte eine regelungstechnische Aufrüstung der Beschichtungsanlage zusammen mit der Herstellerfirma des Coaters. Damit konnte ein entscheidender Schritt in Richtung Vereinfachung der Bedienbarkeit und Reproduzierbarkeit der geringen FG-Schwankungen erzielt werden. Die Arbeiten umfassen die Messwertaufbereitung der Nassschichtdickenmessung, die motordrehzahlgestützte Füllstandregelung im Druckluftbehälter und die Vorbereitung einer vollautomatischen Nassschichtdickenregelung im laufenden Beschichtungsprozess.

Dieses Arbeitspaket wurde fristgerecht abgeschlossen.

### 2.3.7 AP 3.7 – Validierung der Qualitätssicherungskonzepte

Dauer: 01.10.2011 bis 30.09.2013

Es wurde ein Qualitätsregelkreis der Qualitätssicherungsmaßnahmen definiert (Abbildung 118).

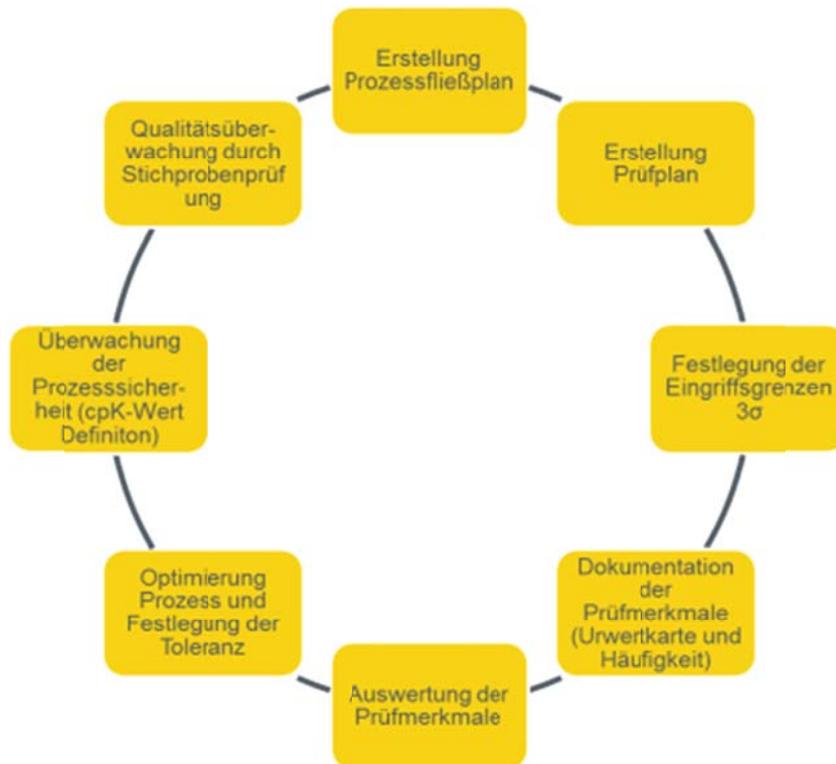


Abbildung 118: Qualitätsregelkreis

Die Maßnahmen der Qualitätsüberwachung durch Stichprobenprüfung und Optimierung Prozess und Festlegung der Toleranz wurden abgeschlossen. Folgende Maßnahmen wurden beschlossen.

- 100 % Erfassung Masse der trockenen Wickel
- Stichproben Erfassung Dimensionen (Dicke) Separator
- Stichproben Erfassung Außenmaße Gehäuse
- Stichproben Erfassung Masse Gehäuse
- 100 % Erfassung Masse Elektrolyt
- 100 % Erfassung 1 kHz- Impedanz vor und nach der Reifelagerung
- 100 % Erfassung Dicke der Zelle bei 20 % SOC vor Auslieferung
- 100 % Erfassung Dicke der Zelle nach Elektrolyt befüllen
- Stichprobenerfassung Dicke der Zelle bei 100% SOC
- R<sub>p</sub>DC Wickel 100 %
- Kennzeichnung Wickel 100 %
- Masse Wickel vor Pressen 100 %
- Wasserwerte nach Trocknen pro Ausheizvorgang
- Wickeldicke bei Pressen 2 t
- Spannungsverlust n. 1 Woche, 2 Wochen und 3 Wochen 100 %
- 100 % Erfassung Kapazitätsverlust nach 3 Wochen
- 100 % Kurzschlussprüfung Pole/Gehäuse
- 100 % Spannungsprüfung Pole/Gehäuse

Die Zellbalance ist von entscheidender Bedeutung für die Zellperformance (Zyklusfestigkeit, Belastbarkeit, Sicherheit). Anode und Kathode müssen daher sehr präzise gefertigt werden. Abbildung 119 und Abbildung 120 zeigen, dass die Flächengewichte von Anode und Kathode innerhalb der Toleranzgrenze liegen.

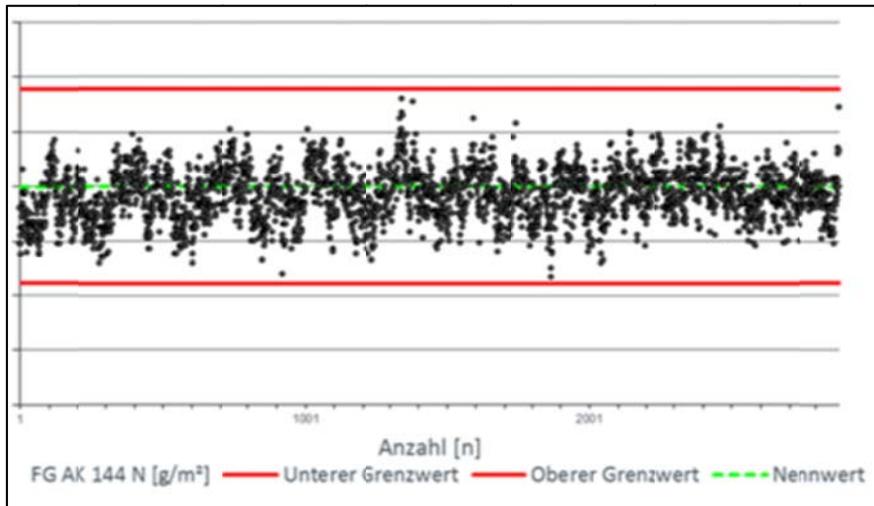


Abbildung 119: Flächengewichte der Anode

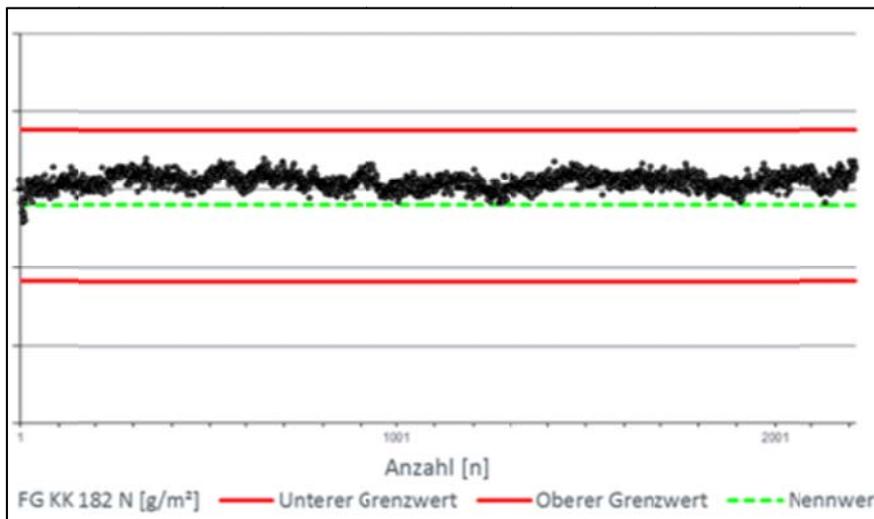


Abbildung 120: Flächengewichte der Kathode

Ob die getroffenen Qualitätssicherungsmaßnahmen ausreichen, lässt sich an der Qualität des Endproduktes messen.

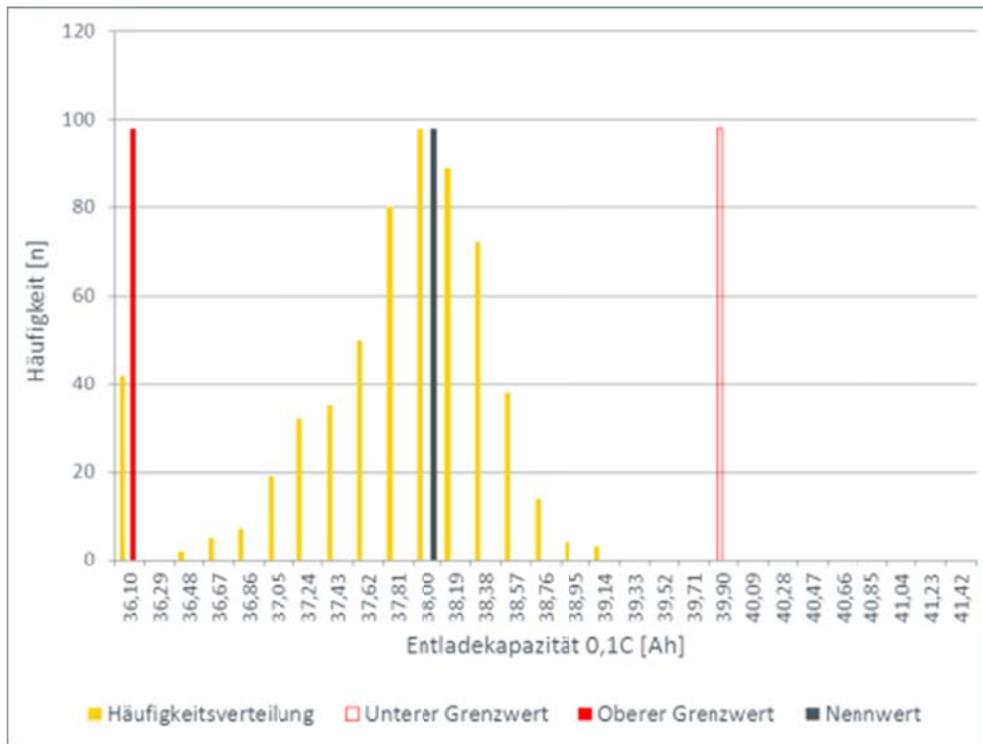


Abbildung 121: Verteilung der Entladekapazitäten von PHEV-2-Zellen

Abbildung 121 zeigt die Verteilung der Entladekapazität. Die Qualität der Zellen ist sehr gut. Dies ist sehr wichtig für die Verwendung der Zellen im Elektrofahrzeug, da ansonsten bei der sogenannten Equilibrierung viel Energie verloren geht. Man erkennt in Abbildung 121, dass die Arbeiten zu diesem Arbeitspaket erfolgreich und fristgerecht abgeschlossen wurden.

## 2.4 AP 4 – Nachweis der Skalierbarkeit der erforschten Fertigungsmethodik anhand der 60 Ah-Forschungsversuchs-Zellen (Generation 2) gemäß finalem Zell-Lastenheft

Dauer: 01.10.2013 bis 31.05.2014

Das Arbeitspaket 4 gliedert sich gemäß Tabelle 10 in Unterarbeitspakete.

AP-Nr.	Arbeitspakete (AP)	2010								2011								2012								2013								2014			
		II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	I	II													
	Projektmonat	1	2	3	4	5	6	7	8	9	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#		
4	Nachweis der Skalierbarkeit der erforschten Fertigungsmethodik anhand der 60Ah-Forschungsversuchs-Zellen (Generation 2) gemäß finalem Zell-Lastenheft																																				
4.1	Bau von 30-40 Ah-Forschungs-Versuchszellen (60 Ah Zell Konzept) auf den eingefahrenen Versuchsanlagen gemäß finalem Zelllastenheft für Erprobung unter automobiltypischen Bedingungen bei VOLKSWAGEN																																				
4.2	Identifikation von sensitiven Prozess- und Zellchemieparametern																																				
4.3	Prüfung der Qualität der hergestellten Zellen mittels der erarbeiteten Konzepte																																				
4.4	Überprüfung der Prozessparameter zur Realisierung einer reproduzierbaren Qualität																																				
4.5	Projektabschluss																																				
MS8	- Nachweis der Skalierbarkeit der erforschten Fertigungsmethodik ist anhand 60Ah-Forschungs-Versuchszellen gemäß finalem Lastenheft erbracht - Automotive-Fähigkeit der 60Ah-Zelle anhand von 30-40 Ah Zellen nach Lastenheft ist abgesichert - Projekt ist abgeschlossen																																				

Tabelle 10: Gantt-Diagramm zu den Arbeiten im Rahmen des Arbeitspaketes 4

### 2.4.1 AP 4.1 – Bau von 60 Ah-Forschungs-Versuchszellen auf den eingefahrenen Versuchsanlagen gemäß finalem Zelllastenheft für Erprobung unter automobiltypischen Bedingungen bei VOLKSWAGEN

Dauer: 01.10.2013 bis 31.03.2014

Die Erfahrungen und Erkenntnisse der Prototypenfertigung wurden in Arbeitsanweisungen zusammengefasst. Jeder Prozessschritt erhält eine eigene Arbeitsanweisung, die den ausführenden Mitarbeitern regelmäßig in Mitarbeiterschulungen nahegebracht wird. Die Planung der wöchentlichen Tätigkeiten für den geregelten Ablauf der Bauphase erfolgte, wie in Abbildung 122 dargestellt.

Schlussbericht Zuwendungsempfänger  
Förderkennzeichen: 0327889 A

Montag		Dienstag		Mittwoch		Donnerstag		Freitag
16.12.2013		17.12.2013		18.12.2013		19.12.2013		20.12.2013
x	MH	x	MH	x	MH	x	MH	x
x	MH	x	MH	x	MH	x	MH	x
CPA_07	MH	CPA_08	MH	x	MH	x	MH	x
x	MH	x	MH	x	MH	x	MH	x
CPA_06_Typ_1654	DA SA	CPA_07_Typ_1654_Seite A	DA SA	CPA_07_Typ_1654_Seite B	DA SA	CPA_08_Typ_1254	DA SA	Reinigung
KK 236	AKr	CPA_06_Typ_1654	AKr	KK 237	AKr	CPA_07_Typ_1654	AKr	CPA_08_Typ_1254
KK 236	AKr	CPA_06_Typ_1654	AKr	KK 237	AKr	CPA_07_Typ_1654	AKr	CPA_08_Typ_1254
01.2b.0412 (42) IX	TB BL	01.2b.0412 (42) X	TB BL	01.2b.0412 (42) XI	TB BL	01.2b.0412 (42) XII	TB BL	x
01.2b.0412 (42) IX	TB BL	01.2b.0412 (42) X	TB BL	01.2b.0412 (42) XI	TB BL	01.2b.0412 (42) XII	TB BL	x
01.2b.0412 (36) VIII	RS	01.2b.0412 (42) IX	RS	01.2b.0412 (42) X	RS	01.2b.0412 (42) XI	RS	Halbteile
01.2b.0412 (36) VIII	CR	01.2b.0412 (42) IX	CR	01.2b.0412 (42) X	CR	01.2b.0412 (42) XI	CR	x
01.2b.0412 (36) VII	RS	01.2b.0412 (36) VIII	RS	01.2b.0412 (42) IX	RS	01.2b.0412 (42) X	RS	Halbteile
x	CR	x	CR	x	CR	x	CR	x
x	CR	x	CR	x	CR	x	CR	x
01.2b.0412 (72) VI	CR AKr	x	CR AKr	x	CR AKr	x	CR AKr	CR AKr
01.2b.0412 (72) VI	CR	x	CR	x	CR	x	CR	CR
x	AKI RK	01.2b.0412 (72) VI	AKI RK	x	AKI RK	x	AKI RK	x
01.2b.0412 (36) III	RS	x	RS	x	RS	01.2b.0412 (72) VI	RS	Halbteile
01.2b.0412 (36) IV								
01.2b.0412 (36) V								

Abbildung 122: Beispiel eines Wochenplanes für den Ablauf des Zellbaus

Der Aufbau des Wochenplanes zeigt auf der linken Seite die Strukturierung des Bauprozesses nach Maschinen. Von oben beginnend wird die Paste hergestellt mit den beiden Maschinen der 50 Liter-Mischer. Anschließend wird die Paste auf dem Beschichter zu Elektrodenbändern veredelt. Danach werden die Elektrodenbänder von Rolle zu Rolle auf dem Kalander auf die Zieldicke verdichtet und auf der Rollenschere zugeschnitten. Auf der Wickelmaschine werden aus Anoden-, Kathoden- und Separatorbändern trockene Wickel hergestellt. Diese Wickel werden sofort auf der Wickelpresse verdichtet und danach in Spannplatten auf Maß gehalten. Danach beginnt der Montageprozess der Einzelzelle. Auf dem Laser beginnt die Kontaktierung der Bauteile für den Deckel mit den Poldurchführungen. Darauf folgend wird der kontaktierte Wickel das erste Mal getrocknet im Ofen. Am nächsten Tag wird der getrocknete Wickel in das Gehäuse eingefügt und über den bereits kontaktierten Deckel mit dem Becher verschweißt. Dies geschieht wiederum auf dem Laser. Das Gehäuse ist jetzt fertig montiert. Es besteht noch eine kleine Öffnung im Deckel, die zur Elektrolytbefüllung genutzt wird. Durch diese Öffnung wird im zweiten Trocknungsprozess ebenfalls im Ofen die letzte Feuchtigkeit der Zellen entzogen. Der Trocknungsprozess ist die Vorbereitung zur Befüllung mit Elektrolyt auf der Anlage. Nach der Befüllung wird die Zelle mit einem Rückschlagventil verschlossen und zum Temperprozess im Ofen gebracht. Als vorletzter Prozess läuft der Formationsprozess auf der Formationsanlage ab. Nach der Formation wird die Zelle am Laser ein drittes Mal bearbeitet. Es wird das Elektrolytbefüllloch mit einer Kugel verschlossen und verschweißt.

Die weiteren Bestandteile des Wochenplanes sind die Tagesleiste oben mit ihren Spalten darunter. In den Spalten stehen die Chargennummern der Zellen, die an dem jeweiligen Tag an den entsprechenden Maschinen bearbeitet werden.



Abbildung 123: Mischprozess mit unterschiedlichen Mischphasen

Der Mischprozess, wie in Abbildung 123 dargestellt, bringt 32 Liter Kathodenpaste und 34 Liter Anodenpaste hervor. Dieser dauert 5 h und kann innerhalb einer Schicht mit allen vor- und nachgelagerten Arbeitsschritten von einem Mitarbeiter erledigt werden.



Abbildung 124: Beschichter mit dem Herzstück, der präzisen Beschichtungswalze

Aus diesen Pastenvolumina werden nach Abzug aller prozessbegleitenden Verluste eine Anoden-Bandlänge von ca. 900 m und eine Kathoden-Bandlänge von ca. 800 m auf der Beschichtungswalze, wie in Abbildung 189 zu sehen, hergestellt. Diese Mengen lassen sich mit 2 Mitarbeitern in einer Schicht verarbeiten.

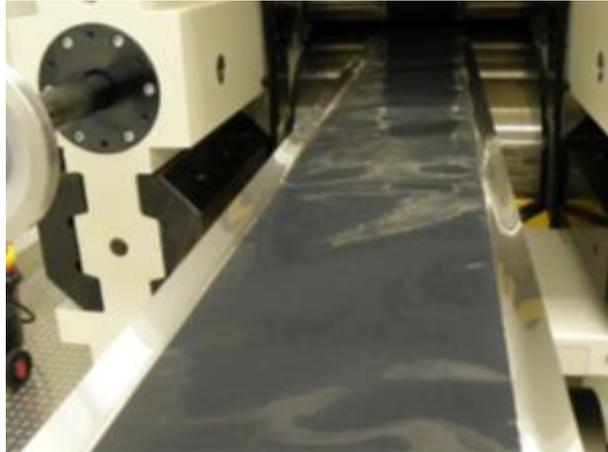


Abbildung 125: Verdichtungsprozess am Kalandrierband mit Elektrodenband im finalen Bearbeitungszustand

Der Kalandrierungsprozess, vgl. Abbildung 125, verarbeitet mit einer Effizienz von 97 % die Bänder vom Beschichter. Dieser Prozess wird zusammen mit dem Schneidprozess, vgl. Abbildung 126, im Trockenraum von einem Mitarbeiter in einer Schicht verarbeitet.

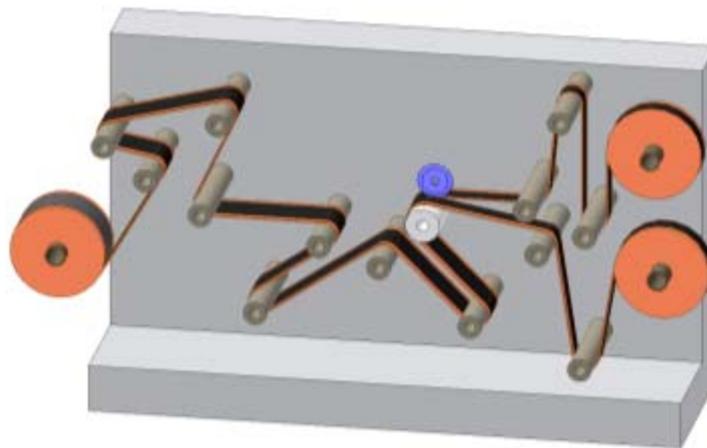


Abbildung 126: Schneidprozess an der Rollenschere

An der Wickelmaschine arbeiten 2 Mitarbeiter, die in einer Schicht bis zu 60 trockene Wickel herstellen. Diese Wickel werden gepresst, getestet, beschriftet und in Spannplatten für die nachgelagerten Prozessschritte im Trockenraum eingelagert. Waren alle bisher beschriebene Prozessschritte nicht getaktet, so sind alle nachgelagerten Prozessschritte vom Takt der Formationsanlage bestimmt. In einer Fertigungskampagne können 48 Wickel hergestellt werden, die anschließend formiert werden können. Daher werden der Kontaktierungsprozess und der Verschlussprozess mit dieser Stückzahl pro Tag eingeplant.

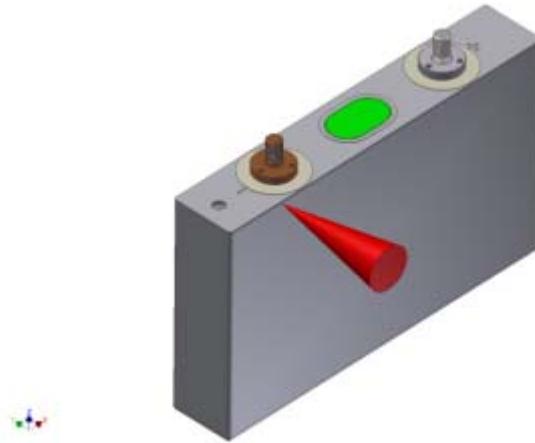


Abbildung 127: Verschlussprozess des Gehäuses am Laser



Abbildung 128: Aktivierungsprozess an der Elektrolytbefüllungsanlage

Die Stückzahl von 48 Zellen pro Tag zieht sich vom Deckelschweißen (Abbildung 127) über das Aktivieren (Abbildung 128) bis zum Tempern (Abbildung 129) durch.



Abbildung 129: Temperprozess in den Öfen

Dieses Arbeitspaket wurde fristgerecht abgeschlossen.

## 2.4.2 AP 4.2 – Identifikation von sensitiven Prozess- und Zellchemieparametern

Dauer: 01.10.2013 bis 31.03.2014

Es wurden sensitive Prozess- und Zellchemieparameter durch Auswertung der zuvor genannten Qualitätssicherungsdaten identifiziert.

Hierzu wurde aus den vorhandenen Messdaten eine Korrelationsanalyse durchgeführt, welche Zusammenhänge zeigt und Vorhersagen möglich macht. Die Korrelation ist eine eindeutige Beziehung zwischen 2 Merkmalen. Welche als errechnete Korrelationszahl als Ziffer ausgedrückt wird (Abbildung 130).

Folgende Schritte wurden zur Ermittlung durchgeführt:

- Merkmale aufnehmen
- Werte dokumentieren
- Diagramm erstellen
- Ausgleichsgerade zeichnen
- Ausgleichsgerade errechnen
- Korrelationszahl ermitteln

Je stärker die Korrelation zweier Merkmale ist, desto eher kann auch ein ursächlicher Zusammenhang vorliegen. Deshalb ist es wichtig, diese Stärke der Korrelation in einer Ziffer auszudrücken. Dies ist die Korrelationszahl K (Abbildung 196), sie kann maximal 1 betragen.

Damit steht eine Kennzahl zur Verfügung, die die Güte angibt, in der die Merkmale einer festen Beziehung folgen.

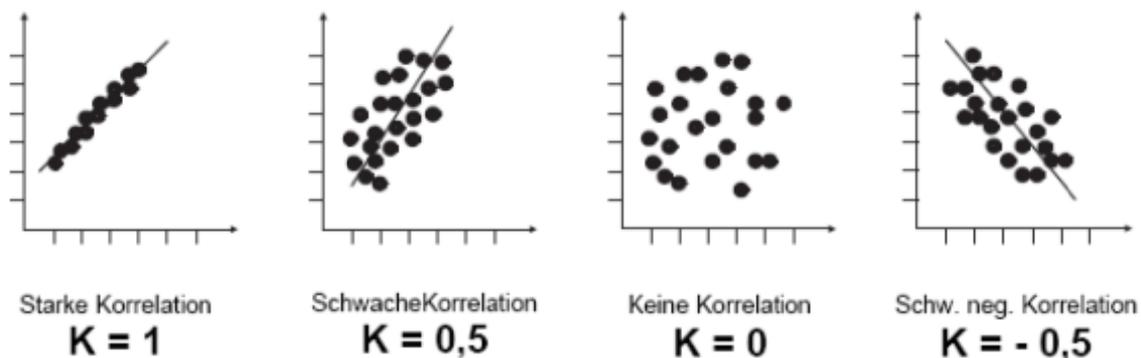


Abbildung 130: Korrelationsdiagramme im Vergleich

Ziel ist, durch frühzeitige Erkennung signifikanter Prüfmerkmale, in der Wertschöpfungskette spätere Qualitätseigenschaften der Zelle zu erkennen und somit frühzeitig die Möglichkeit hat, eventuelle Gegenmaßnahmen einzuleiten bzw. Informationen zu erhalten.

## 2.4.3 AP 4.3 – Prüfung der Qualität der hergestellten Zellen mittels der erarbeiteten Konzepte

Dauer: 01.10.2013 bis 31.03.2014

Es wurde ein Qualitätsregelkreis der Qualitätssicherungsmaßnahmen definiert (siehe Abschnitt 3.7)

Für jeden Prozessschritt gibt es einen Prozessprüfplan, der definiert welche Parameter geprüft werden. Für jeden Prozessschritt werden dann die Eingriffsgrenzen festgelegt. Die Prüfmerkmale werden dokumentiert und ausgewertet. Der gesamte Prozess wird durch obere und untere Warngrenzen gesteuert und optimiert. Liegt der cpk (cmk) Wert über 1,67 so ist die Prozesssicherheit gewährleistet.

Ein Beispiel dafür ist die Kathodenherstellung. Die Werte werden in eine Kreuzkarte eingetragen und statistisch ausgewertet. Daraus lassen sich auch neben der Bestimmung von Mittelwert und Standardabweichung auch Aussagen zur Prozessfähigkeit des Prozessschrittes machen. In den Dokumenten sind neben dem Nennmaß (NMA) die untere (UWG) und die obere (OWG) Warngrenze und der untere (UGW) und obere (OGW) Grenzwert eingetragen. Man erkennt deutlich wie der

Beschichtungsprozess bei Erreichen der UWG oder der OWG nachgeregelt wird und der gesamte Prozess stabilisiert wird.

#### 2.4.4 AP 4.4 – Überprüfung der Prozessparameter zur Realisierung einer reproduzierbaren Qualität

Dauer: 01.10.2013 bis 31.03.2014

Zur Realisierung einer reproduzierbaren Qualität wurden die verschiedenen Parameter und die Erkenntnisse aus den einzelnen Vorversuchen, in einen sogenannten Parameter- und Einstellplan (Abbildung 131) zusammengefasst.

Ferner wurden in dieser Übersichtsliste die Einstellwerte dokumentiert und angepasst, um die vorgegebenen Nennmaße innerhalb Ihres Toleranzbereiches zu erreichen.

Parameter- und Einstellplan						
Produktname / Beschreibung			Fertigungsanweisung			
CP 0854 / CP 1254 / CP 1654			FA VW-VM 1002			
<b>Prozessschritt:</b>	1060 / 1080 / 1100		Beschichteten Kupferfolie			
<b>Maschine, Anlage</b>	Kroenert Coater		<b>Aufstellungsort:</b>	Kroenert Beschichtungsraum		
<b>Prozessverantwortlicher:</b>	R. Sekler					
Prozessparameter						
Paste						
Parameter	Maß, Eigenschaft	Einheit	Toleranzen	untere/obere Eingriffsgrenze		
Viskosität (bei Start der Beschichtung)		mPas	-			
Temperatur in Pastenvorlagesystem		°C				
Anode						
Parameter	Maß, Eigenschaft	Einheit	Toleranzen	untere/obere Eingriffsgrenze		Materialbezeichnung/ Anmerkung
Dicke Kollektor		µm				
Flächengewicht Anodenfilm einseitig		g/m <sup>2</sup>				
Flächengewicht Anodenfilm beidseitig		g/m <sup>2</sup>				
Filmbreite, nass		mm				
Filmbreite, trocken		mm				
Deckungsgleichheit		-				
CP 0854						
Länge intermittierende, innen	...	mm				
Länge unbeschichteter Bereich, innen	...	mm				
Länge intermittierende, außen	...	mm				
Länge unbeschichteter Bereich, außen	...	mm				
CP 1254						
Länge intermittierende, innen		mm				
Länge unbeschichteter Bereich, innen		mm				
Länge intermittierende, außen		mm				
Länge unbeschichteter Bereich, außen		mm				
CP 1654						
Länge intermittierende, innen		mm				
Länge unbeschichteter Bereich, innen		mm				
Länge intermittierende, außen		mm				
Länge unbeschichteter Bereich, außen		mm				
Umgebungsbedingungen						
Parameter	Maß, Eigenschaft	Einheit	Toleranzen	untere/obere Eingriffsgrenze		
Temperatur		°C				
relative Luftfeuchtigkeit		%				

Abbildung 131: Parameter und Einstellplan am Beispiel Prozess Beschichteten Kupferfolie

In diesem Parameter- und Einstellplan sind ferner auch die Eingriffsgrenzen definiert nach welchen der Prozess geregelt wird.

Durch Vorgabe der Prozessparameter wurde eine einheitliche und konstante Qualität erreicht, welche an einer Qualitätsregelkarte visualisierbar ist. Sobald die definierte Eingriffsgrenze erreicht wird, wird der Prozess nach Parametervorgabe im Parameter und Einstellplan nachgeregelt, um den Prozess bzgl. seiner Lage und Fähigkeit in den vergebenen Toleranzgrenzen zu führen.

#### 2.4.5 AP 4.5 – Projektabschluss

Dauer: 01.10.2013 bis 31.03.2014

Alle Arbeiten liegen im Plan. Für alle noch offenen Arbeitspakete werden die Meilensteine eingehalten, da sich keine unkalkulierbaren Risiken mehr darstellen. Der Projektabschluss wird ausführlich im Abschlussbericht dargestellt.

## 2.5 Arbeiten während der freiwilligen Verlängerungsphase

In der freiwilligen Verlängerungsphase sind 3 wesentliche Themenschwerpunkte bearbeitet worden:

- Änderung des Wickeldesigns zur Erhöhung der massenspezifischen Energiedichte.
- Änderung des Designs der äußeren Kontaktbereiche zur Erhöhung der volumenspezifischen Energiedichte des kompletten Batteriemoduls.
- Machbarkeitsuntersuchungen zur Aufbringung von keramischen Schichten mit dem Ziel das Verhalten der Zellen im Sicherheitstest zu verbessern. Zur Bearbeitung des ersten Aufgabenbereiches ist die Erzielung eines optimalen Elektrodenergebnisses mit dickeren Schichtdicken und dünneren Trägerfolien notwendig. Im speziellen wurde die Foliendicke auf 8  $\mu\text{m}$  bei der Anode und auf 12  $\mu\text{m}$  bei der Kathode verringert. Die Beschichtungsdicke wurde signifikant um mindestens 4 % erhöht. Die Prozessschritte Beschichten, Kalandrieren, Schneiden und Wickeln sind direkt davon betroffen.

Beim Beschichten sind dünnere Folien aufwändiger zu handhaben. Dünnere Folien bilden leichter Falten und bei vergleichbaren Zugkräften sind bei dünneren Folien Zugspannungen höher. Daher sind Beschichtungsvorgänge stetig von Abrissen betroffen. Das Entscheidende ist die Erhaltung des qualitativ hochwertigen Querprofils. Die Herausforderung konnte erfolgreich gemeistert werden, so dass die Qualität gehalten werden konnte. Als Beispiel ist in Abbildung 132 das Ergebnis dokumentiert.

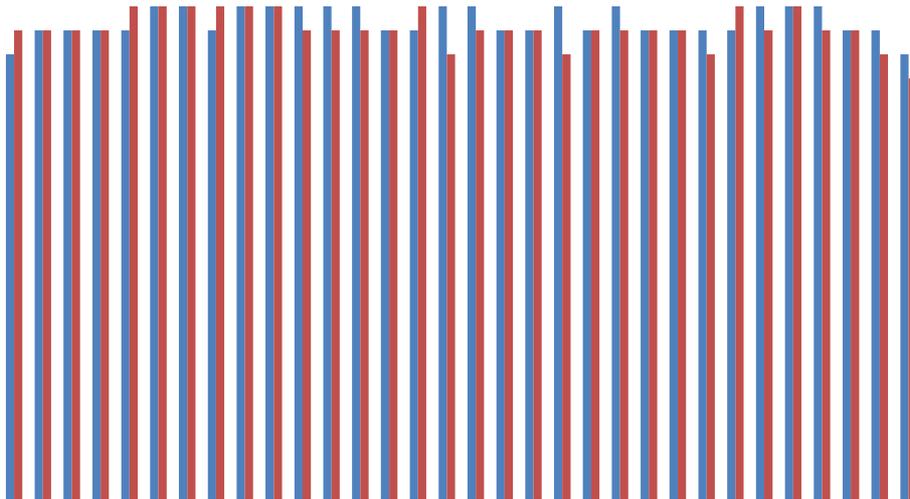


Abbildung 132: Querprofil einer Beschichtung mit optimalen Kanten

Diese Form des Querprofils führt zu optimalen Ergebnissen in den nachfolgenden Prozessschritten. Besonders beim Kalandrieren zahlt sich das qualitativ hochwertige Ergebnis aus. Die Kalandrierung zeigt in Abbildung 133 auch bei geringeren Foliendicken und höheren Beschichtungsdicken das gleiche hochwertige Ergebnis wie bei der ursprünglichen Elektrodenkonfigurationen.

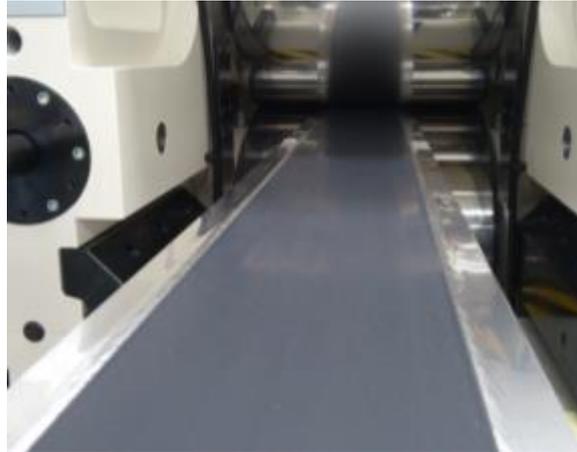


Abbildung 133: Qualität der kalandrierten Elektrode mit optimalem Querprofil

Die weiteren Prozessschritte umfassen Schneid- und die Wickelvorgänge. Der Wickelprozess konnten mit konstanter Qualität angepasst werden. Die entscheidenden Qualitätsmerkmale sind die Deckungsgleichheit der Kanten, die Faltenfreiheit der Wickelradien und die Schnittkanten der flexibel zugeschnittenen Ableiterkanten.

### Flachpole



Abbildung 134: Gegenüberstellung der Flachpole und der Schraubpole

Um beim Batteriebau im Kopfraum Platz zu sparen und damit die volumetrische Energie- und Leistungsdichte zu erhöhen, wurden die alten Schraubterminals durch sogenannte Schweißterminals ersetzt. Abbildung 134 zeigt die Unterschiede der beiden Konzepte. Die Schweißterminals ermöglichen eine platzsparende Verbindung der Einzelzellen. Allerdings bedeutet der Wechsel der Terminals eine wesentliche Änderung der kompletten Zelle. Die spezifische Wärmekapazität und vor allem der Wärmeübergang vom Pol auf die Ableiterkabel wird verändert. Dies hat Auswirkungen auf das Verhalten der Zellen bei den Sicherheitstests. Besonders sensibel ist hier der Überladetest. Da die Zellkapazität erhöht wurde, steigt entsprechend die Testvorschrift sowohl der Überladestrom als auch die Überladekapazität an, wodurch der Test wesentlich verschärft wird. Das bedeutet, dass der Überladestrom von 36 A auf 38 A und die Überladekapazität von 36 Ah auf 38 Ah steigt.

Bemerkenswert ist, dass sowohl die Zellen der Serie 399 (Schraubpole; 10 $\mu$ m-Cu- und 12 $\mu$ m-Al-Folie) als auch die Zellen der Serie 400 (Flachpole; 10 $\mu$ m-Cu- und 12 $\mu$ m-Al-Folie) den Überladetest trotz des höheren Überladestroms und der höheren Überladekapazität bestehen. Bei den Zellen mit Schraubpolen haben 7 Zellen den Test mit Hazard-Level 3 bestanden, eine mit Hazard-Level 4. Bei den Zellen mit Flachpolen haben 3 Zellen den Test mit Hazard-Level 3 und eine mit Hazard-Level 4 bestanden.

Alle Zellbauformen wurden intensiv untersucht. Die Arbeiten zu diesem Arbeitspaket wurden daher erfolgreich und fristgerecht abgeschlossen.

### **Vorversuche zur keramischen Beschichtung**

Die Versuche zur Herstellung von keramischen Schichten in diesem Abschnitt dienten der Abschätzung der technischen Machbarkeit. Dazu wurden im Hause der Zulieferers Versuche mit kalandrierten Elektroden und angelieferte keramischen Pasten Versuche durchgeführt.

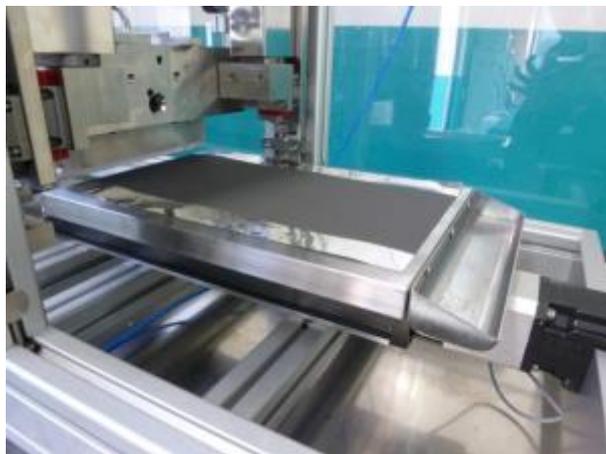


Abbildung 135: Aufbau des Beschichtungsversuches im Hause des Lieferanten für Beschichtungstechnik

Die Versuche wurden derart geführt, dass alle Maschinenparameter ermittelt wurden, um die Nutzbarkeit der Schlitzdüse für die ultradünnen keramischen Schichten abschätzen zu können.

Letztendlich kann bei definiertem Spaltabstand, definierter Beschichtungsgeschwindigkeit und konstanter Durchflussmenge eine finale getrocknete Filmdicke im einstelligen  $\mu\text{m}$ -Bereich hergestellt werden. Die Düsenposition und die Spaltweite zwischen den beiden Gießerplatten wurden ebenfalls mit hinreichender Genauigkeit bestimmt. Prinzipiell steht das Ergebnis fest: Die keramische Beschichtung im Schlitzdüsenverfahren ist möglich.

## **3 Fortschreibung des Verwertungsplans**

### **3.1 Liste der Erfindungen / Schutzrechtsanmeldungen**

Folgende Erfindungen oder Schutzrechte wurden im Laufe des Projektes angemeldet:

<b>Aktenzeichen</b>	<b>Benennung</b>
10 2011 075 063.0	Formatfreie Herstellung asymmetrischer Wickelelektroden
10 2011 082 631.9	Intermittierendes Beschichten von bewegten Oberflächen
10 2012 217 682 B3	Schaltbares Schlitzventil für eine Beschichtungsanlage, Beschichtungsanlage und Verwendung der Anlage
10 2012 217 683 B3	Schaltbares Schlitzventil für eine Beschichtungsanlage, Beschichtungsanlage und Verwendung der Anlage
Noch nicht veröffentlichte Anmeldungen	
10 2013 216 046.1	Verfahren und Zusammensetzung zur Herstellung positiver Elektroden für Lithium-Ionen-Batterien

Tabelle 11: Liste der Erfindungen und Schutzrechtsanmeldungen

Im Rahmen des Patentanmeldeprozesses wurden auch Auslandsanmeldungen getätigt.

## 3.2 Verwertungsplan

Im Rahmen des Forschungsprojekts Li-FeM wurde die Fertigungsmethodik für neuartige wettbewerbsfähige Lithium-Ion-Hochenergiebatteriezellen für eine spätere Großserienfertigung in Deutschland erforscht.

Innerhalb des Projekts wurde eine Vielzahl neuartiger Fertigungsmethoden untersucht, validiert und innovative Prozesse als Erfindung angemeldet. So gelang es z.B. in enger Zusammenarbeit mit der Fa. Kroenert, die Elektrodenpasten mit einer Präzision von  $\leq 1 \mu\text{m}$  auf ultradünne Kollektorfolien aufzutragen. Zum Vergleich konnte bei Versuchen bei japanischen Herstellern von Beschichtungsanlagen, nur eine Präzision von  $\leq 2 \mu\text{m}$  erreicht werden. Die von VW-VM patentierte Laserschneide- und Wickeltechnologie bringt eine um ca. 15% höhere Volumenausnutzung im Zellgehäuse. Diese hohe Ausnutzung kann derzeit nur mit der viel langsameren Stapeltechnologie erreicht werden. Eine konstruktiv einfache, aber hochdichte Poldurchführung hilft die späteren Herstellungskosten senken. Dies gilt auch für den recht erfolgreichen Forschungsansatz, Anodenelektroden auf wässriger Basis nicht nur kostengünstiger sondern vor allem viel umweltschonender herzustellen. Für Kathodenelektroden wurden in ersten Versuchen vielversprechende Ergebnisse mit wasserbasierten Pasten erhalten, so dass darauf aufbauend weitere Forschungsarbeiten sinnvoll erscheinen.

In Summe bilden die Forschungsergebnisse eine sehr erfolgsversprechende Basis für eine anschließende Serienentwicklung, Planung und Aufbau der Anlagen sowie den Start einer geplanten Serienproduktion mit hoher Wettbewerbsfähigkeit in Deutschland. Anders als ursprünglich geplant wurden im Hinblick auf eine spätere Großserienfertigung möglichst viele deutsche Anlagenhersteller eingebunden. Das Projekt hat gezeigt, dass Deutschland mit seinem hervorragenden Maschinenbau, sehr schnell in der Lage war, hochpräzise Forschungsanlagen zu liefern. Sehr positiv war beispielsweise die Zusammenarbeit mit der Fa. Nerling, welche erstmals mit VW-VM einen Trockenraum aufgebaut hat und somit Ihr Geschäftsfeld erweitern konnte.

Bei den Betrachtungen zur Wettbewerbsfähigkeit zeigte es sich, dass die Preise für Batteriezellen schneller fielen, als zum Projektstart prognostiziert. Dabei sind die Materialkosten der Hauptkostentreiber. Die Materialien wurden aber hauptsächlich von asiatischen Lieferanten geliefert, die damit auch den Zuliefermarkt dominierten. Deutsche Lieferanten, wie die BASF und Südchemie (Clariant) konnten sich auch im Rahmen dieses Projektes weiter entwickeln und bauten ihre Marktposition weiter aus.

Voraussetzung für eine erfolgreiche und nachhaltige Verwertung ist die Erreichung der jeweiligen Ziele in den folgenden Kategorien:

- Zellperformance
- Wirtschaftlichkeit
- Wettbewerbsfähigkeit (Technik, Kosten)
- Sicherheit (automotiver Einsatz)
- Zuverlässigkeit (automotiver Einsatz)

### 3.2.1 Wirtschaftliche Erfolgsaussichten

Es war das Ziel, dass am Ende des Projekts Forschungsergebnisse vorliegen, die dafür verwendet werden können, Batteriezellen in automotive Serienanwendungen zu bringen. Die entsprechenden technischen Projektziele wurden mindestens erreicht. Für eine wirtschaftliche Verwertung ist es aber erforderlich, dass sich die Batteriezellen wirtschaftlich in Deutschland herstellen lassen. Aufgrund des rapiden Preisverfalls bei den aktuellen Batteriezellen stellt das noch eine sehr große Herausforderung dar.

Die gewonnenen Erkenntnisse bilden aber die Basis für Arbeiten an technisch verbesserten Batteriezellen auf der Grundlage weiterer Zellchemien und Herstellungsverfahren. Mit verbesserten Eigenschaften würden solche Batteriezellen dann das Potenzial für eine wirtschaftliche Herstellung in Deutschland besitzen. Das kann dann eine Basis für eine Großserienfertigung zur Versorgung der deutschen und internationalen Automobilindustrie mit Batteriezellen sein. Die Abhängigkeit von ausländischen Batterielieferanten würde damit dann verringert.

Aktuelle und potenzielle deutsche Zulieferfirmen haben auf Basis der Forschungsergebnisse auch die Möglichkeit, ihre Position im globalen Wettbewerb weiter auszubauen und zu festigen.

### **3.2.2 Wissenschaftliche und / oder technische Erfolgsaussichten**

Im Rahmen des Forschungsprojektes Li-FeM konnten Fertigungsmethoden für bislang noch nicht verwendete Materialien und Materialkombinationen untersucht und auf den Forschungsanlagen validiert werden. Viele Fragestellungen konnte gelöst werden, allerdings bestehen noch weitere offene Fragen, speziell im Bereich der Erforschung der Verarbeitungsmethoden von Nanomaterialien. So sind beispielsweise Silizium-Komposit-Anoden ein weltweit zielführender Ansatz für den Bau von Lithium-Ionen Zellen mit sehr hoher Energiedichte für höhere elektrische Reichweiten.

Auf Grundlage der bekannten und in Li-FeM erforschten Erkenntnisse kann davon ausgegangen werden, dass im Zuge weiterer Forschungen diese Fragestellungen geklärt werden und damit die Grundlage für eine industrielle und wettbewerbsfähige Verwertung gelegt wird.

### **3.2.3 Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit**

Die Ergebnisse und Erkenntnisse aus dem Forschungsprojekt bilden die Basis für zukünftige Aktivitäten. Das können beispielsweise neuartige, innovative Fertigungsmethoden für Zellchemien wie Ni-reiche oder Li-reiche Zellchemien sein. Aber auch die Batteriegehäuse müssen weiter erforscht werden z.B. im Hinblick auf das Zelldesign (Hartcase / Pouch) oder der Integration von intelligenten Sensoren und Sicherheitselementen um die Integration im Elektrofahrzeug in Bezug auf Platzbedarf, Lebensdauer und Sicherheit noch weiter zu verbessern.

Im Rahmen des Projektes Li-FeM wurden auch Forschungsarbeiten über die wirtschaftlichen Zusammenhänge der Fertigungsmethodik und der Zellkosten angefertigt. Die darin gewonnenen Erkenntnisse versetzten die VOLKSWAGEN VARTA Microbattery Forschungsgesellschaft in die Lage, eine valide Kostenkalkulation einer Großserienfertigung für Lithium-Ionen-Batteriezellen zu erstellen und alle Verfahrensschritte auf ihre Kosteneffizienz hin zu optimieren. Mit dem erforschten Kostenmodell können die Prozesse hinsichtlich Material-, Energie- und Kosteneffizienz sehr gezielt weiter erforscht werden, damit das Kostenziel bei Batteriezellen und somit eine breite Marktdurchdringung von Elektrofahrzeugen gewährleistet wird.

## **4 Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben**

Aus Sicherheitsgründen wurden die Arbeiten an den 60 Ah-Zellen eingestellt.

Die Kontaktierung der Rundzelle konnte konstruktiv nicht zuverlässig dargestellt werden.

## **5 Präsentationsmöglichkeiten für mögliche Nutzer – z.B. Anwenderkonferenzen (Angaben, soweit die Art des Vorhabens dies zulässt)**

Ergebnisse aus diesem Forschungsprojekt können, wie in der Vergangenheit auch geschehen, auf den einschlägigen Konferenzen vorgestellt werden. Weiterhin finden detaillierte Ergebnispräsentationen in bei der VOLKSWAGEN AG und bei VARTA Microbattery GmbH statt.

## **6 Einhaltung der Kosten- und Zeitplanung**

Unter Berücksichtigung der inhaltlichen Veränderung des Forschungsvorhabens und der Verlängerung wurden die Kosten- und Zeitplanung eingehalten.

## 7 Abkürzungsverzeichnis

<b>AG</b>	Antigasungsadditiv
<b>ASI</b>	area specific impedance (Flächenbezogener Widerstand)
<b>BL</b>	Belastungstest
<b>BOL</b>	beginning of life (Neuzustand)
<b>BS</b>	Butansulton
<b>C</b>	Kapazität
<b>cc</b>	constant current (konstanter Strom)
<b>CID</b>	Current Interruption Device
<b>CHB</b>	Cyclohexylbenzol
<b>cv</b>	constant voltage (konstante Spannung)
<b>DB</b>	Deckschichtbildner
<b>DEC</b>	Diethylcarbonat
<b>DFZ</b>	Druckflachzelle
<b>DMC</b>	Dimethylcarbonat
<b>DOD</b>	depth of discharge (Entladetiefe)
<b>E</b>	Energie
<b>EC</b>	Ethylencarbonat
<b>EELA</b>	Entladeenergie
<b>ELA</b>	Entlade-
<b>ELAD</b>	Ladeenergie
<b>EMC</b>	Ethylmethylcarbonat
<b>EOC</b>	end of charge (Ladeschluss)
<b>EOD</b>	end of discharge (Entladeschluss)
<b>EOL</b>	end of life (Lebensende)
<b>EV</b>	electric vehicle (Elektrofahrzeug)
<b>FMEA</b>	Fehlermöglichkeits- und Einfluss-Analyse
<b>HEV</b>	hybrid electric vehicle (Hybrid-Fahrzeug)
<b>HL</b>	hazard level (Gefahrenstufe)
<b>HT</b>	Hochtemperatur-
<b>I</b>	Stromstärke
<b>IELA</b>	Entladestrom
<b>ILAD</b>	Ladestrom
<b>Kap.</b>	Kapazität
<b>LCO</b>	Lithium-Cobalt-Oxid
<b>LM</b>	Lösungsmittel
<b>LFP</b>	Lithiumeisenphosphat
<b>Li-NaS</b>	Erforschung von Nano-Silizium-Kohlenstoff-Kompositmaterialien und Batteriezellen-Designs für leistungs- und wettbewerbsfähige Lithium-Ionen-Zellen für CO <sub>2</sub> -arme automobile Anwendungen
<b>LMO</b>	Lithium-Mangan-Oxid (Spinell)
<b>MSA</b>	Measurement System Analysis

Schlussbericht Zuwendungsempfänger  
Förderkennzeichen: 0327889 A

<b>nC</b>	Koeffizient, zur relativen Angabe von Lade- bzw. Entladeströmen. Der nC-Koeffizient bezieht sich auf den Nennlade- oder Nennentladestrom, der die vollständige Entladung einer vollgeladenen Batterie innerhalb 1/n Stunden erzielt. Er berechnet sich durch Division eines absoluten Lade- oder Entladestromes durch die Nennkapazität der Batterie und erhält damit die Einheit n/h.
<b>NCA</b>	Lithium-Nickel-Cobalt-Aluminium-Oxid
<b>NMC, NCM</b>	Lithium-Nickel-Mangan-Cobalt-Oxid (LiNi <sub>1/3</sub> Mn <sub>1/3</sub> Co <sub>1/3</sub> O <sub>2</sub> )
<b>OCV</b>	open-circuit voltage (Leerlaufspannung)
<b>P</b>	Leistung
<b>PC</b>	Propylencarbonat
<b>PCH</b>	Ladeleistung
<b>PDCH</b>	Entladeleistung
<b>PE</b>	Polyethylen
<b>PHEV</b>	plug-in hybrid electric vehicle (Hybrid-Fahrzeug mit externer Ladung)
<b>PHEV2</b>	plug-in hybrid electric vehicle 2 (Zellformat)
<b>PO</b>	Polyolefin
<b>PP</b>	Polypropylen
<b>R</b>	Widerstand
<b>Ri</b>	Innenwiderstand
<b>RT</b>	Raumtemperatur, 23°C
<b>SEI</b>	solid electrolyte interphase (Elektroden/Elektrolyt-Grenzfläche)
<b>SOC</b>	state of charge (Ladezustand)
<b>T</b>	Temperatur
<b>U</b>	Spannung
<b>Ü</b>	Überladeadditiv
<b>U<sub>max</sub></b>	obere Spannungsgrenze
<b>U<sub>min</sub></b>	untere Spannungsgrenze
<b>VC</b>	Vinylencarbonat
<b>VW VM</b>	VOLKSWAGEN VARTA Microbattery Forschungsgesellschaft mbH & Co. KG

## 8 Inhaltsverzeichnis

1	Beitrag des Ergebnisses zu den förderpolitischen Zielen, z.B. des Förderprogramms (ggf. unter Angabe des Schwerpunkts), -soweit dies möglich ist- ..... <b>Fehler! Textmarke nicht definiert.</b>	
2	Wissenschaftlich-technisches Ergebnis des Vorhabens, die erreichten Nebenergebnisse und die gesammelten wesentlichen Erfahrungen .....	3
2.1	AP 1 – Technisch-organisatorische Vorbereitungen.....	3
2.1.1	AP 1.1 - Erstellung des Lastenheftes für die Erforschung der Fertigungsmethodik .....	4
2.1.2	AP 1.2 - Räumliche Verlagerung der vorhandenen Anlagen nach vorliegendem Plan .....	6
2.1.3	AP 1.3 - Orientierende Versuche zur Fertigungsmethodik .....	7
2.1.4	AP 1.4 - Schulung des Personals (Sicherheit, Umgang mit großformatigen Zellen) .....	12
2.2	AP 2 – Erforschung der Fertigungsmethodik für 30-40 Ah-Zellen (Generation 1), Aufbau und Einfahren der Versuchsanlagen .....	13
2.2.1	AP 2.1 - Erstellung Lastenhefte der Anlagentechnik auf Basis der Zelllastenhefte (von 30Prof.40 Ah Zellen) .....	19
2.2.2	AP 2.1.1 – Erstellung Lastenheft Trockenmischer.....	22
	2.2.2.1 AP 2.1.2 – Erstellung Lastenheft Maschinenteknik zur Herstellung von SiC-Komposit .....	23
	2.2.2.2 AP 2.1.3 – Erstellung Lastenheft Nassmischer.....	24
	2.2.2.3 AP 2.1.4 – Erstellung Lastenheft Beschichtungsanlage Elektroden..	24
	2.2.2.4 AP 2.1.5 – Erstellung Lastenheft Kalander .....	25
	2.2.2.5 AP 2.1.6 – Erstellung Lastenheft für Wickelautomat .....	26
	2.2.2.6 AP 2.1.7 – Erstellung Lastenheft Elektrolytbefüllung .....	27
	2.2.2.7 AP 2.1.8 – Erstellung Lastenheft Formationsanlage .....	28
	2.2.2.8 AP 2.1.9 – Erstellung Lastenhefte Prüffeldanlagen .....	28
	2.2.2.9 AP 2.1.10 – Erstellung Lastenheft Trockenraumerweiterung .....	29
2.2.3	AP 2.2 - Konzeption des Zellmusterbaus für 30-40 Ah-Zellen .....	30
	2.2.3.1 AP 2.2.1 - Konzeption des Zellmusterbaus für Rundzellen .....	30
	2.2.3.2 AP 2.2.2 - Konzeption des Musterbaus für prismatische Zellen .....	31
2.2.4	AP 2.3 - Identifikation geeigneter Lieferanten und ggf. Zweitlieferanten für Anlagentechnik und Komponenten.....	31
2.2.5	AP 2.4 - Aufbau und Inbetriebnahme Versuchsanlagen .....	31
	2.2.5.1 AP 2.4.1 - Aufbau und Inbetriebnahme Trockenmischer.....	33
	2.2.5.2 AP 2.4.2 - Aufbau und Inbetriebnahme Maschinenteknik zur Herstellung von SiC-Komposit .....	34
	2.2.5.3 AP 2.4.3 - Aufbau und Inbetriebnahme Nassmischer.....	35
	2.2.5.4 AP 2.4.4 - Aufbau und Inbetriebnahme Beschichtungsanlage Elektroden .....	35
	2.2.5.5 AP 2.4.5 - Aufbau und Inbetriebnahme Kalander .....	36
	2.2.5.6 AP 2.4.6 - Aufbau und Inbetriebnahme Wickelautomat.....	37
	2.2.5.7 AP 2.4.7 - Aufbau und Inbetriebnahme Schweißanlage für Ableiter .	38
	2.2.5.8 AP 2.4.8 - Aufbau und Inbetriebnahme LASER (Schweißen Deckel / Becher).....	38
	2.2.5.9 AP 2.4.9 - Aufbau und Inbetriebnahme Elektrolytbefüllungsanlage ..	39
	2.2.5.10 AP 2.4.10 - Aufbau und Inbetriebnahme Formationsanlage .....	39
	2.2.5.11 AP 2.4.11 - Aufbau und Inbetriebnahme Prüffeld .....	40

Schlussbericht Zuwendungsempfänger  
Förderkennzeichen: 0327889 A

	2.2.5.12	AP 2.4.12 - Aufbau und Inbetriebnahme Trockenraumerweiterung 40	
	2.2.5.13	AP 2.4.13 – Modifizierung Rollenschere.....	41
	2.2.6	AP 2.4.14 – Aufbau und Inbetriebnahme Bandtrockner .....	43
	2.2.7	AP 2.5 - Einfahren der Versuchsanlagen .....	43
	2.2.8	AP 2.6 – Erstellung eines Zell-Lastenheftes für die 60 Ah-Großserie .....	46
	2.2.9	AP 2.7 - Musterbau von runden und prismatischen 30-40Ah-Forschungs- Versuchszellen.....	46
	2.2.10	AP 2.7.1 – Musterbau von Rundzellen .....	46
	2.2.11	AP 2.7.2 – Musterbau von prismatischen Zellen .....	52
	2.2.12	AP 2.8 - Erforschung der Fertigungsmethodik für runde und prismatische 30- 40 Ah-Zellen auf Basis dreier Zellchemiesysteme.....	57
	2.2.12.1	AP 2.8.1 - Erforschung der Fertigungsmethodik für Rundzellen ...	57
	2.2.12.2	AP 2.8.2 - Erforschung der Fertigungsmethodik für prismatische Zellen.....	64
	2.2.13	AP 2.9 – Erarbeitung erster Qualitätssicherungskonzepte .....	75
2.3		AP 3 – Erforschung der Fertigungsmethodik für 60 Ah-Zelle (Generation 2) .....	77
	2.3.1	AP 3.1 – Erstellung Lastenhefte für die Fertigungsmethodik auf Basis der Zelllastenhefte (von 60 Ah-Zellen).....	77
	2.3.2	AP 3.2 – Aufbau des Zellmusterbaus für 60 Ah-Zellen auf Basis einer Zellgeometrie und zweier Zellchemiesysteme.....	80
	2.3.2.1	AP 3.2.1 – Konzeption des Musterbaus für Zellchemie 1 .....	80
	2.3.2.2	AP 3.2.2 – Konzeption des Musterbaus für Zellchemie 2.....	81
	2.3.3	AP 3.3 – Anpassung der Versuchsanlagen (Formatänderung und erhöhte Sicherheits-Anforderungen) für 60 Ah-Zellen .....	81
	2.3.4	AP 3.4 Inbetriebnahme der angepassten Versuchsanlagen .....	87
	2.3.5	AP 3.5 Einfahren der angepassten Versuchsanlagen.....	89
	2.3.6	AP 3.6 Musterbau von 30-40 Ah-Forschungsversuchs-Zellen (60 Ah Zell- Konzept).....	90
	2.3.6.1	AP 3.6.1 Musterbau von 30-40 Ah-Forschungsversuchs-Zellen mit Zellchemie 1 (60 Ah Zell-Konzept).....	90
	2.3.6.2	AP 3.6.2 Musterbau von 30-40 Ah-Forschungsversuchs-Zellen mit Zellchemie 2 (30 Ah Zell-Konzept).....	93
	2.3.7	AP 3.7 – Validierung der Qualitätssicherungskonzepte .....	98
2.4		AP 4 – Nachweis der Skalierbarkeit der erforschten Fertigungsmethodik anhand der 60 Ah-Forschungsversuchs-Zellen (Generation 2) gemäß finalem Zell-Lasten-heft .....	101
	2.4.1	AP 4.1 – Bau von 60 Ah-Forschungs-Versuchszellen auf den eingefahrenen Versuchsanlagen gemäß finalem Zelllastenheft für Erprobung unter automobiltypischen Bedingungen bei VOLKSWAGEN .....	101
	2.4.2	AP 4.2 – Identifikation von sensitiven Prozess-und Zellchemieparametern.	106
	2.4.3	AP 4.3 – Prüfung der Qualität der hergestellten Zellen mittels der erarbeiteten Konzepte .....	106
	2.4.4	AP 4.4 – Überprüfung der Prozessparameter zur Realisierung einer reproduzierbaren Qualität .....	107
	2.4.5	AP 4.5 – Projektabschluss .....	107
2.5		Arbeiten während der freiwilligen Verlängerungsphase.....	108
3		Fortschreibung des Verwertungsplans .....	110
	3.1	Liste der Erfindungen / Schutzrechtsanmeldungen .....	110
	3.2	Verwertungsplan.....	111
	3.2.1	Wirtschaftliche Erfolgsaussichten .....	111
	3.2.2	Wissenschaftliche und / oder technische Erfolgsaussichten .....	112
	3.2.3	Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit .....	112
4		Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben.....	112
5		Präsentationsmöglichkeiten für mögliche Nutzer – z.B. Anwenderkonferenzen (Angaben, soweit die Art des Vorhabens dies zulässt) .....	112
6		Einhaltung der Kosten- und Zeitplanung .....	112

Schlussbericht Zuwendungsempfänger  
Förderkennzeichen: 0327889 A

7	Abkürzungsverzeichnis .....	113
8	Inhaltsverzeichnis .....	115
9	Abbildungsverzeichnis .....	118
10	Tabellenverzeichnis .....	121
11	Literaturverzeichnis.....	122

## 9 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Prozesskette zur Herstellung automobiltauglicher Li-Ionen-Batteriezellen	5
Abbildung 2:	Layout-Planung für die Arbeitsbereiche der VOLKSWAGEN VARTA Microbattery Forschungsgesellschaft mbH & Co KG	6
Abbildung 3:	Regalaufbau für Formation und Reifelager am neuen Standort.	7
Abbildung 4:	Zyklisierungsverhalten einer Kathode bei 20 °C hergestellt aus Pulver ohne (oben, 053562.2c.0103) und mit (unten, 053562.2c.102) Vorbehandlung im Trockenmischer.	9
Abbildung 5:	REM-Aufnahme einer fertigen Si/C-Komposit Anode in 20.000-facher Vergrößerung. Sichtbar sind Silizium- und Rußpartikel auf mehreren Grafitplättchen.	9
Abbildung 6:	Streifenbildung im Beschichtungsbild aufgrund von Agglomeraten in der Anodenpaste	10
Abbildung 7:	Beschichtungswerk in der Ausbauf orm eines Kommarakelsystems	11
Abbildung 8:	Beispiel einer optimalen intermittierenden Beschichtung	11
Abbildung 9:	Ergebnisse US-Schweißversuche an Aluminium- (links) und Kupfer-Ableiter- Bündeln (rechts).	12
Abbildung 10:	Eingangsparameter und Ergebnisausgabe des Kostenmodells	15
Abbildung 11:	Herstellkosten- und Materialeinzelkostenverteilung einer NMC-Batterie zelle <sup>2</sup>	17
Abbildung 12:	Preisverlauf von Lithiumcarbonat, Cobalt, Nickel, Mangan und NMC	18
Abbildung 13:	Prozessschema der Zellenherstellung mit den zu erforschenden Prozessen und zugehörigen Investitionen	20
Abbildung 14:	Beispiel eines Trockenmischers der Fa. Zeppelin vom Typ FML 10	23
Abbildung 15:	Beispiel eines lastenheftkonformen Doppelplanetenmischers	24
Abbildung 16:	Schematische Darstellung der Komponenten einer lastenheftkonformen Beschichtungsanlage	25
Abbildung 17:	Darstellung des Elektrodenautomaten für den Umbau zur Wickelmaschine.	27
Abbildung 18:	Beispieldarstellungen unterschiedlich realisierbarer Wickel-Designs: a) Prismatisch, gegenläufige Ableiter, b) Primastisch, gleichläufige Ableiter, c) Rund, gegenläufige Ableiter, d) Rund, gleichläufige Ableiter.	27
Abbildung 19:	Layout Trockenraum mit Rollenschere und Kalander.	30
Abbildung 20:	Trockenmischen aller Pastenbestandteile	34
Abbildung 21:	Rührwerkskugelmühle mit Datenaufzeichnung, Anschlussleitungen vom Vorlagebehälter, Umwälzpumpe und Kühlsystem	34
Abbildung 22:	Versuchsaufbau zur Pastenfiltration	36
Abbildung 23:	Entstehung eines 30-Ah-Rundwickels auf Aluminiumdorn	38
Abbildung 24:	Blick in das Bearbeitungszentrum des Lasers	38
Abbildung 25:	Vollständig aufgebauter Trockenraum. Am Boden erkennt man die im Boden eingelassenen Stahlplatten zur Erhöhung der Traglast von Kalander und Kran	40
Abbildung 26:	Teil der Klimatisierungstechnik	41
Abbildung 27:	Trockenraumerweiterung nach Inbetriebnahme	41
Abbildung 28:	Rollenschere im Trockenraum.	41
Abbildung 29:	Geschnittene Elektrode ohne Schnittgrat am Al- oder Cu-Kollektor	42
Abbildung 30:	Geschnittene Elektrode mit Schnittgrat und Materialabbrüchen	42
Abbildung 31:	Nach VW-VM-Vorgabe konzipierter Durchlauftrockner	43
Abbildung 32:	Intermittierende Beschichtung: Ausschnitt Elektrodenband (links) und Verdichtungsvorgang im Kalander (rechts)	44
Abbildung 33:	Schichtdickenverlauf der unkalandrierten Elektrode (Kathode) in Längsrichtung. Die Start- und Abrisskanten sind deutlich überhöht.	45
Abbildung 34:	Schichtdickenverlauf der kalandrierten Elektrode (Kathode) in Längsrichtung. Die Abweichungen liegen im Bereich $< \pm 1,5 \%$ .	45
Abbildung 35:	Zelle mit 2 halbmondförmigen Multikontaktscheiben auf einer Seite	47
Abbildung 36:	Rundzelle mit Poldurchführung und Berstmembran.	47
Abbildung 37:	Vergleich Wickelstation für runde (links) und prismatische Wickel (rechts)	48
Abbildung 38:	Rundzelle mit Poldurchführung, Berstmembran und Außenisolation.	48
Abbildung 39:	Abdruck vom Kontaktblech auf Plusseite des Wickels.	49
Abbildung 40:	Wickel mit vormontiertem Kontaktfederelement und Aluminiumbecher	49
Abbildung 41:	Trocken montierte Zelle vor Laserschweißung von Deckel mit Becher	50
Abbildung 42:	30-40-Ah Rundzelle mit Schrumpfschlauch für die elektrische Außenisolation	50
Abbildung 43:	Formationskiste mit montierten Rundzellen	51

Schlussbericht Zuwendungsempfänger  
Förderkennzeichen: 0327889 A

Abbildung 44:	Elektrische Konatktierung während der Formation der Rundzelle	51
Abbildung 45:	Zyklen und elektrische Test im Prüffeld (Sicherheitsprüfschrank)	51
Abbildung 46:	Ablängen der Ableiter im Musterbau	53
Abbildung 47:	Befüllung Pink-Ofen	54
Abbildung 48:	Ausheizung im Ofen	54
Abbildung 49:	Elektrolyt-Befüllung	55
Abbildung 50:	Ausschnitt aus der vollautomatischen Wickelanlage	55
Abbildung 51:	Ausschnitt aus dem Schnittwerkzeug mit Messersatz, Absaugung und Schutzeinhausung	56
Abbildung 52:	Schnittwerkzeug eingebaut in pneumatischer Presse mit Absaugung im Trockenraum	56
Abbildung 53:	Anlegen der Seiten von Hand	57
Abbildung 54:	Entfernung des überstehenden Etikettenrandes mit einem Keramikmesser	57
Abbildung 55:	Konstruktionszeichnung der assemblierten Becher und Deckel für 30 Ah-Rundzellen.	58
Abbildung 56:	3-D Darstellung der 30 Ah Lithium-Ion Rundzelle	59
Abbildung 57:	30-Ah Lithium-Ion Rundzelle	59
Abbildung 58:	Deckeldesign bis Mitte 2011 (links) und überarbeitetes Deckeldesign mit präziserem Öffnungsdruck und Sicherheitslasche (rechts)	60
Abbildung 59:	Zellkonstruktion mit aufgeschweißten Multikontaktscheiben	61
Abbildung 60:	Zellaufbau mit Multikontaktscheibe (links) und Detaildarstellung der Multikontaktscheibe (rechts)	61
Abbildung 61:	Gesamtansicht der Rundzelle mit gefederter Multikontaktscheibe	62
Abbildung 62:	Explosionsdarstellung der Rundzelle und ihrer Einzelteile	63
Abbildung 63:	Werkzeug zur Herstellung der Multikontaktscheibe (Sigma-Blech)	63
Abbildung 64:	Vormontierte Kontaktierungseinheit für Plus- und Minuspol	64
Abbildung 65:	Konstruktionszeichnung der assemblierten Becher und Deckel für die prismatische 30-Ah Zelle	65
Abbildung 66:	3-D Darstellung der prismatischen 30 Ah-Zelle	65
Abbildung 67:	Prismatische 30 Ah-Lithium-Ion-Zelle	66
Abbildung 68:	30 Ah Lithium-Ion prismatische Zelle. Der Pfeil zeigt die Nahtstelle zwischen Deckel und Becher welche mittels Laser verschweißt wird. In der Deckelmitte ist die Berstmembran eingeprägt.	66
Abbildung 69:	30-40 Ah PHEV2 Zelle mit Kunststoffolie als Isolation und Korrosionsschutz	67
Abbildung 70:	Schutzschaltung mit pneumatischem Druckschalter und Widerstand	68
Abbildung 71:	Forschungsversuchszellen noch ohne Außenisolation	68
Abbildung 72:	Modifizierte Schweißvorrichtung für Laserschweißen von Wickel mit Deckel	69
Abbildung 73:	Zelle mittels Laserschweißung verschließen	69
Abbildung 74:	Fertige Zelle ohne Käfig über der Berstmembran	69
Abbildung 75:	Zelle nach 800 Zyklen. Beginn der Lithium-Plattierung auf der Anode	70
Abbildung 76:	Insbesondere im Bereich kleiner Biegeradien besteht das Risiko der partiellen Ablösung der Elektrodenmasse vom Kollektor.	70
Abbildung 77:	Ansicht der Stapelebene der Stapelmaschine mit Zuführung von Separator (links) und Vakuumgreifern mit Elektroden (rechts)	71
Abbildung 78:	Z-Stapel mit 197 Elektroden	71
Abbildung 79:	Ansicht des Bearbeitungszentrums des Lasers mit Vorrichtung zum Verschweißen von Deckel und Gehäuse	71
Abbildung 80:	Ansicht eines lasergeschweißten Deckels	72
Abbildung 81:	Fertige Paste am Mischwerkzeug mit glatter Erscheinung und idealem Abtropfverhalten als Zeichen optimal eingestellter Viskosität	72
Abbildung 82:	Darstellung des Zusammenhanges zwischen der Viskosität bei 25 °C und den qualitätsbestimmenden Beschichtungsparametern für 2 verschiedene Pastenarten	73
Abbildung 83:	Asymmetrische, beidseitige vollflächige, intermittierende Beschichtung auf Kupferfolie	73
Abbildung 84:	Symmetrische, beidseitige vollflächige, intermittierende Beschichtung auf Aluminiumfolie	74
Abbildung 85:	Längsprofil entlang des beschichteten Bereiches einer intermittierend beschichteten Elektrode mit Start- und Abrisskantenüberhöhung	74
Abbildung 86:	Längsprofil entlang des beschichteten Bereiches einer intermittierend beschichteten Elektrode ohne Start- und Abrisskantenüberhöhung	75

Schlussbericht Zuwendungsempfänger  
Förderkennzeichen: 0327889 A

Abbildung 87:	Schematische Darstellung des APQP Verfahrens	76
Abbildung 88:	3D-Zeichnungen von 30-40 Ah PHEV2-Zelle und 60 Ah BEV1-Zelle (rechts)	78
Abbildung 89:	Teilansicht des Musterbaus mit Handmontagplätzen für 30-40 und 60 Ah-Zellen	80
Abbildung 90:	Vorläufige Zellkonstruktion 60 Ah Zelle mit den Zellabmessungen: 145,5 mm x 91 mm x 57 mm	81
Abbildung 91:	Formationsanlage mit Sicherheitskabinen	82
Abbildung 92:	Gasversorgung der Kohlendioxidlöschanlage	82
Abbildung 93:	Lasergeschweißte Deckel mit Becher vor der Elektrolytbefüllung	83
Abbildung 94:	60 Ah-Zelle nach Endverschluss	83
Abbildung 95:	Detektor	84
Abbildung 96:	Rauchgassensor und Abluftrohr	84
Abbildung 97:	60 Ah-Zellen im Lade- und Entladetest in Sicherheits-Thermoschränken und mit angeschlossener Zyklenanlage	85
Abbildung 98:	Diagramm über den Nageltest einer 60-Ah-Zelle	86
Abbildung 99:	Nageltest einer 60-Ah-Zelle mit starker Rauch und Feuerentwicklung	86
Abbildung 100:	Sicherheitsglasscheibe nach dem Nageltest der 60 Ah Zelle	87
Abbildung 101:	Temperierschränke mit Lösungsmittelsensoren und Abluftanlage	87
Abbildung 102:	Formations- und Zykelpplätze mit Rauchgassensoren und Abluftanlage	88
Abbildung 103:	Hergestellte 60 Ah-Forschungsversuchszellen zur Abnahme und Freigabe der modifizierten Forschungsversuchsanlagen	89
Abbildung 104:	Schweißvorrichtung für die Verbindung der Ableiterbündel mit den Polplatten	89
Abbildung 105:	Beispiel einer 60 Ah-Forschungsversuchszelle im fertigen Zustand (links) und Auswirkungen des Nageltest einer 60 Ah-Forschungsversuchszelle (rechts).	90
Abbildung 106:	Versatz der Einzelschnitthöhen bei Verwendung der Zange.	91
Abbildung 107:	Gesamtansicht der pneumatischen Trimm-Vorrichtung für Ableiterbündel.	91
Abbildung 108:	Detailaufnahme der Absaugvorrichtung an der pneumatischen Trimm-Vorrichtung	91
Abbildung 109:	Detailaufnahme vom einwandfreien Schnittergebnis der pneumatischen Trimm-Vorrichtung	92
Abbildung 110:	Abdrücke von Schweißperlen auf der Elektrodenoberfläche	93
Abbildung 111:	Querprofil einer LFP-Beschichtung mit Kantenüberhöhung	94
Abbildung 112:	Schadensbild einer Kantenüberhöhung beim Aufwickeln am Beschichter	94
Abbildung 113:	Querprofil einer LFP-Beschichtung ohne Kantenüberhöhung	95
Abbildung 114:	Querprofil einer LFP-Beschichtung mit geringer Kantenüberhöhung	95
Abbildung 115:	Querprofil einer LFP-Beschichtung mit minimal abfallenden Kanten	96
Abbildung 116:	Querprofil einer LFP-Beschichtung mit optimalen Kanten	96
Abbildung 117:	Qualität der kalandrierten LFP-Elektrode mit optimalem Querprofil	97
Abbildung 118:	Qualitätsregelkreis	98
Abbildung 119:	Flächengewichte der Anode	99
Abbildung 120:	Flächengewichte der Kathode	99
Abbildung 121:	Verteilung der Entladekapazitäten von PHEV-2-Zellen	100
Abbildung 122:	Beispiel eines Wochenplanes für den Ablauf des Zellbaus	102
Abbildung 123:	Mischprozess mit unterschiedlichen Mischphasen	103
Abbildung 124:	Beschichter mit dem Herzstück, der präzisen Beschichtungswalze	103
Abbildung 125:	Verdichtungsprozess am Kalandrier mit Elektrodenband im finalen Bearbeitungszustand	104
Abbildung 126:	Schneidprozess an der Rollenschere	104
Abbildung 127:	Verschlussprozess des Gehäuses am Laser	105
Abbildung 128:	Aktivierungsprozess an der Elektrolytbefüllungsanlage	105
Abbildung 129:	Temperprozess in den Öfen	105
Abbildung 130:	Korrelationsdiagramme im Vergleich	106
Abbildung 131:	Parameter und Einstellplan am Beispiel Prozess Beschichten Kupferfolie	107
Abbildung 132:	Querprofil einer Beschichtung mit optimalen Kanten	108
Abbildung 133:	Qualität der kalandrierten Elektrode mit optimalem Querprofil	109
Abbildung 134:	Gegenüberstellung der Flachpole und der Schraubpole	109
Abbildung 135:	Aufbau des Beschichtungsversuches im Hause des Lieferanten für Beschichtungstechnik	110

## 10 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Gantt-Diagramm zu den Arbeiten im Rahmen des Arbeitspaketes 1	4
Tabelle 2:	Ergebnisse Schrumpfungsversuche bei 120 °C/1 h	8
Tabelle 3:	Gantt-Diagramm zu den Arbeiten im Rahmen des Arbeitspaketes 2	14
Tabelle 4:	Erwartete Kostendegression für verschiedene Komponenten	19
Tabelle 5:	Arbeiten zu den Arbeitspaketen AP 2.1.1. bis 2.1.9	22
Tabelle 6:	Zusammenfassung AP 2.4.1 – 2.4.14	33
Tabelle 7:	Ergebnisse 2011	52
Tabelle 8:	Gantt-Diagramm zu den Arbeiten im Rahmen des Arbeitspaketes 3	77
Tabelle 9:	Unterschiede in der Fertigungsmethodik und den Prozessparameter von 30-40 Ah und 60 Ah-Zelle	80
Tabelle 10:	Gantt-Diagramm zu den Arbeiten im Rahmen des Arbeitspaketes 4	101
Tabelle 11:	Liste der Erfindungen und Schutzrechtsanmeldungen	110

## 11 Literaturverzeichnis

- <sup>1</sup> Deutsche Akademie der Technikwissenschaften: Wie Deutschland zum Leitanbieter für Elektromobilität werden kann. Acatech bezieht Position, Nr. 6: Berlin, 2010.
- <sup>2</sup> Schünemann, J.: Cost-oriented manufacturing of lithium ion battery cells. Advanced Battery Power, 25.03.2014, Münster, 2014.
- <sup>3</sup> Institute of Information Technology, Ltd. Institute of Information Technology, Ltd. (Hrsg.): LIB Cell Materials Market Bulletin (07Q1). Tokio (Japan), März, 2007
- <sup>4</sup> Institute of Information Technology, Ltd. Institute of Information Technology, Ltd. (Hrsg.): Introduction: The Start of the "LIB-related Study Program 10-11". Tokio (Japan), April, 2010
- <sup>5</sup> Angerer, G.; Erdmann, L.; Marscheider-Weidemann, F.; Scharp, M.; Lüllmann, A.: Rohstoffe für Zukunftstechnologien: Einfluss des branchenspezifischen Rohstoffbedarfs in rohstoffintensiven Zukunftstechnologien auf die zukünftige Rohstoffnachfrage. 2. Stuttgart: Fraunhofer Verl, 2009
- <sup>6</sup> Foders, F.; Kim, C.: Perspektiven des Manganmarktes am Vorabend des Tiefseebergbaus: eine Analyse alternativer Szenarien. In: Die Weltwirtschaft (1982), S. 75–94
- <sup>7</sup> Holzapfel, M.; KKL (Hrsg.): Energiespeicherung in Batterien – Stand der Technologie im Hinblick auf Elektromobilität und die Speicherung regenerativer Energie. November, 2011
- <sup>8</sup> Anderson, E. R.; TRU Group Inc. (Hrsg.): Shocking Future Battering the Lithium Industry through 2020. 2011
- <sup>9</sup> Meridian International Research; Meridian International Research. (Hrsg.): The Trouble with Lithium 2. Martainville (Frankreich), 2008
- <sup>10</sup> Tahil, W.; Meridian International Research (Hrsg.): Implications of Future PHEV Production for Lithium Demand. Dezember, 2006
- <sup>11</sup> Evans, R. K.: An abundance of Lithium. <http://www.worldlithium.com/Abstract.html>. – Letzter Zugriff am 19.06.2013
- <sup>12</sup> Roland Berger - Strategy Consultants: The Li-Ion Battery Value Chain: Trends and implications. 2011