BMBF-Programm Forschung für die Produktion von morgen „Elektromobilität“

DeLIZ

Produktionstechnisches Demonstrationszentrum für Lithium-Ionen-Zellen

Ergebnisbericht zum Verbundvorhaben
Entwicklung neuer automatisierter Produktionsverfahren zur wirtschaftlichen Massenfertigung von hochenergetischen Lithium-Ionen-Zellen.

Herausgeberin:
Anja Techel



FRAUNHOFER VERLAG

BMBF-Programm Forschung für die Produktion von morgen „Elektromobilität“

DeLIZ

Produktionstechnisches Demonstrationszentrum für Lithium-Ionen-Zellen

Ergebnisbericht zum Verbundvorhaben
Entwicklung neuer automatisierter Produktionsverfahren zur wirtschaftlichen Massenfertigung von hochenergetischen Lithium-Ionen-Zellen.

Anja Techel
Holger Althues
Sven Bräunling
Tobias Föckerer
Volker Franke
Volker Fux
Michael Heinz
Matthias Glonegger
Thomas Hensel
Irene Jansen
Jakob Kurfer
Matthias Lütke
Johann Maaß
Christoph Tammer
Christian Thiemann
Sebastian Tschöcke
Renald Schedewy
Markus Schweier
Jens Standfuß
Markus Westermeier
Martin Wunderer
Tobias Zeilinger

Kontaktadresse:
Fraunhofer-Institut für
Werkstoff- und Strahltechnik IWS
Winterbergstraße 28
01277 Dresden
Telefon (0351) 83391 3473
Telefax (0351) 83391 3440
E-Mail anja.techel@iws.fraunhofer.de
URL www.iws.fraunhofer.de

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über http://dnb.d-nb.de abrufbar.
ISBN 978-3-8396-0339-0

Druck und Weiterverarbeitung:
IRB Mediendienstleistungen
Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB, Stuttgart

Für den Druck des Buches wurde chlor- und säurefreies Papier verwendet.

© by **FRAUNHOFER VERLAG**, 2011
Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB
Postfach 800469, 70504 Stuttgart
Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart
Telefon 0711 970-2500
Telefax 0711 970-2508
E-Mail verlag@fraunhofer.de
URL http://verlag.fraunhofer.de

Alle Rechte vorbehalten

Dieses Werk ist einschließlich aller seiner Teile urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die über die engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes hinausgeht, ist ohne schriftliche Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen sowie die Speicherung in elektronischen Systemen.
Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen und Handelsnamen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass solche Bezeichnungen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und deshalb von jedermann benutzt werden dürften.
Soweit in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z.B. DIN, VDI) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden ist, kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen.

Inhalt

1	**Vorwort**	**5**
2	**Wirtschaftliche Massenfertigung von hochenergetischen Lithium-Ionen-Zellen**	**7**
3	**Stand der Wissenschaft und Technik zu Beginn des Vorhabens**	**8**
4	**Die Vision von DeLIZ**	**10**
5	**Ergebnisse des Forschungsprojektes DeLIZ**	**12**
5.1	Elektrodenbeschichtung im Rolle-zu-Rolle-Verfahren	12
5.2	Konfektionieren der Elektroden und Separatoren	23
5.2.1	Verfahrenstechnische Grundlagenuntersuchungen	23
5.2.2	Automatisierte Anlage zum Lasersublimationsschneiden	32
5.3	Handhaben, Stapeln und Fixieren der Einzelfolien	36
5.3.1	Technologien und Systeme für geometrisch bestimmte Zellen	36
5.3.2	Technologien und Systeme für geometrisch unbestimmte Zellen	42
5.4	Fügen der Folienpakete mit minimalem Übergangswiderstand	52
5.5	Oberflächenaktivierung im Bereich Kontaktfahnen	56
5.6	Herstellung stoffschlüssiger Übergangskontakte aus Al-Cu durch Laser-Induktions-Walzplattieren	64
5.7	Konzeption und Aufbau einer Anlage zur Herstellung stoffschlüssiger Übergangskontakte	69
5.8	Prozessübergreifende Qualitätssicherungskonzepte	77
6	**Zusammenfassung und Ausblick**	**83**
7	**Veröffentlichungen zum Projekt**	**85**
8	**Anschriften der Kooperationspartner**	**86**

1 Vorwort

Elektroantriebe gelten als die Antriebe der Zukunft. Sie arbeiten wesentlich effektiver als Verbrennungsmotoren, sind leise und abgasfrei. Nahezu alle Fahrzeughersteller weltweit arbeiten intensiv an Elektroantrieben für Busse, Pkws, Motorroller und Fahrräder. Defizite bestehen derzeit noch hinsichtlich der Verfügbarkeit kostengünstiger Energiespeichersysteme mit höchster Leistungsdichte. Um auch in der Bundesrepublik Deutschland wieder Kernkompetenzen im Bereich der Batterieproduktion aufzubauen, werden massive Investitionen in Forschung und Entwicklung benötigt. Innovative produktionstechnische Lösungen entlang der gesamten Prozesskette zur Herstellung von Lithium-Ionen-Batterien müssen schnell in einen serientauglichen Status überführt werden.

Die Schwerpunkte des Forschungsprojektes **DeLIZ** lagen auf der Produktionstechnik und Technologieentwicklung für wesentliche Teilschritte der Fertigung von Lithium-Ionen-Zellen (LIZ). Von Mai 2010 bis Juni 2011 arbeiteten 16 Wissenschaftler und 6 Techniker aus drei wissenschaftlichen Einrichtungen durchgängig an der Abarbeitung der verschiedenen Aufgabenstellungen. Die Koordination des Verbundforschungsprojektes oblag dem Fraunhofer IWS Dresden.

Die vorliegende Broschüre fasst die Ergebnisse der Forschungsarbeiten zusammen und soll dazu dienen, das erarbeitete Wissen zielgerichtet weiterzugeben und einer breiten Nutzung zuzuführen. Die dargestellten Ergebnisse basieren auf Arbeiten des Fraunhofer IWS und der TU Dresden (IOF, ILK, IWM) sowie des *iwb* der TU München und des Fraunhofer RMV in Augsburg. Allen Projektbearbeitern sei an dieser Stelle für die offene, kooperative und zu jeder Zeit angenehme Zusammenarbeit gedankt.

Ebenso möchten wir Herrn Dr. Claus-Rupert Hohenthanner, Herrn Steffen Legner, Herrn Robert Matthes und Herrn Tim Schäfer von der Li-Tec Battery GmbH sowie Herrn Dr. Ernst-Robert Barenschee von der Litarion GmbH unseren Dank aussprechen. Sie haben uns mit zahlreichen sachdienlichen Hinweisen im Projekt begleitenden Industrieberaterkreis zur Seite gestanden. Große Anerkennung zollen wir den Herstellern der im Projekt neu aufgebauten Anlagentechnik. Sie haben in sehr kurzer Zeit nahezu Unmögliches möglich gemacht.

Das Verbundprojekt **DeLIZ** wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) unter den Förderkennzeichen 02PO 2640, 02PO 2641 und 02PO 2642 gefördert und vom Projektträger Karlsruhe (PTKA) im Karlsruher Institut für Technologie, Außenstelle Dresden, betreut. Wir danken dem Zuwendungsgeber für die Förderung des Projektes und dem Projektträger für die sachkundige Betreuung. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Dr. Anja Techel
Fraunhofer Institut für
Werkstoff- und Strahltechnik IWS

Dresden, im September 2011

2 Wirtschaftliche Massenfertigung von hochenergetischen Lithium-Ionen-Zellen

Für die Bundesregierung ist Elektromobilität ein Thema von hoher strategischer Bedeutung. Im *Nationalen Entwicklungsplan Elektromobilität* vom August 2009 heißt es: „Um im internationalen Wettbewerb zu bestehen, muss Deutschland zum *Leitmarkt Elektromobilität* werden und die Führungsrolle von Wissenschaft sowie der Automobil- und Zulieferindustrie behaupten". Ziel ist es, „die Forschung und Entwicklung, die Marktvorbereitung und die Markteinführung von batterieelektrisch betriebenen Fahrzeugen in Deutschland voranzubringen."

Zur Erreichung dieses Zieles ist es unabdingbar, in der Bundesrepublik Deutschland wieder eigene Kompetenzen im Bereich der Batterie- und Akku-Produktion aufzubauen. Grundlagen- und Anwendungsforschung in diesem Bereich sind deutlich zu verstärken, ebenso die Ausbildung von Ingenieuren und Naturwissenschaftlern. Parallel dazu müssen innovative produktionstechnische Lösungen entlang der gesamten Prozesskette zur Herstellung von Lithium-Ionen-Batterien schnell in einen serientauglichen Status überführt werden.

Um eine wettbewerbsfähige, automatisierte Serienproduktion von Lithium-Ionen-Batterien basierend auf großformatigen Lithium-Ionen-Zellen zu etablieren, sind geeignete Fertigungstechnologien und Verfahren sowie die dazu notwendige Maschinen- und Anlagentechnik neu oder weiter zu entwickeln. Dabei liegen in nahezu allen Prozessschritten große technische Herausforderungen.

Die Forschungsarbeiten der im DeLIZ-Projekt beteiligten Einrichtungen hatten das Ziel, großserientaugliche Prozesse und Anlagentechnik zur Fertigung von großformatigen Lithium-Ionen-Zellen zu evaluieren und weiterzuentwickeln sowie kurzfristig Kostensenkungspotenziale aufzuzeigen. Schwerpunkte der Arbeiten des ***iwb*** der **TU München** waren der Aufbau einer Automatisierungslösung zum Konfektionieren, Handhaben, Stapeln und Fixieren der Einzelfolien im Trockenraum sowie in Kooperation mit dem Fraunhofer RMV die prozessübergreifende Qualitätssicherung. Die Arbeiten des **ILK und** des **IWM der TU Dresden** hatten die Evaluierung von Automatisierungslösungen für geometrisch unbestimmte Zellformen zum Inhalt.

Das **IOF der TU Dresden** widmete sich gemeinsam mit dem Fraunhofer IWS der Thematik des Konfektionierens mit gepulsten und kontinuierlich strahlenden Lasern sowie der Herstellung von stoffschlüssigen Al-Cu-Übergangskontakten (Zellverbinder). Das **Fraunhofer IWS** konzentrierte sich darüber hinaus auf den Beschichtungsprozess zur Elektrodenherstellung, das Verbinden der Al- und Cu-Folien untereinander und mit dem Ableiter, das Versiegeln der Folienpakete und auf die Konzipierung und den Aufbau einer Anlage zur Herstellung von Al-Cu-Zellverbindern durch Laser-Induktions-Walzplattieren. Prozessübergreifende Qualitätssicherungskonzepte für eine stabile Fertigungskette und ressourcenschonende Produktion begleiteten alle Forschungsarbeiten.

iwb TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN Fraunhofer IWS Dresden

3 Stand der Wissenschaft und Technik zu Beginn des Vorhabens

Leistungsfähige, sichere, langlebige und kostengünstige Energiespeichersysteme sind die Schlüsselkomponente für strombasierte Mobilität. Neben der Produktion von Batteriesystemen ist die Fertigung der dafür notwendigen Hochleistungszellen ein wesentliches Kriterium für internationale Wettbewerbsfähigkeit. Hier besteht in Deutschland Nachholebedarf. Für eine kosteneffiziente, qualitätsgesicherte, großserientaugliche Zell-Fertigung sind kurzfristig Kostensenkungspotenziale aufzuzeigen und schnell in die Fertigung zu überführen. Für die Erstellung gesamtheitlicher technologischer Lösungen zur Herstellung von LIZ-Modulen sind Randbedingungen und Technologiekonzepte zu ermitteln.

Die Herstellung von Elektroden (Anoden und Kathoden) für die Li-Ionen-Zelle durch Schlicker oder Pasten im Rolle-zu-Rolle-Verfahren ist ein erster wesentlicher Prozessschritt. Dabei ist der Trocknungsvorgang (neben der Pastenherstellung) eine für die Qualität entscheidende, aber kostenintensive Maßnahme. Für eine hohe Produktivität werden hohe Bandgeschwindigkeiten und damit lange Trocknerstrecken benötigt. Eine Verkürzung der Trocknungsdauer bei dem Beschichtungsprozess würde erhebliches Einsparpotenzial für Investition und Betrieb der Anlage bedeuten. Darüber hinaus hat der Trocknungsvorgang einen großen Einfluss auf die innere Struktur und dadurch auf die Leistungsparameter der Elektroden. Im Rahmen des Projektes soll zunächst der Einfluss des Trocknungsprozesses auf die Struktur und Leistungsparameter der Schichten untersucht werden. Alternative Heizquellen (Strahlung, Induktion) sind zu evaluieren und das Potenzial zur Einsparung von Produktionskosten durch einen verbesserten, effizienteren Trocknungsprozess ist aufzuzeigen.

Die für die Herstellung von Li-Ionen-Zellen benötigten Folienmaterialien müssen vor dem Prozessschritt Stapeln vereinzelt werden. Die bisher industriell eingesetzte Methode zum Vereinzeln der Folien ist das mechanische Stanzen, das jedoch mit diversen Nachteilen verbunden ist. Zur Vereinzelung sollte ein verschleißfreies oder verschleißarmes Verfahren eingesetzt werden, das flexibel an unterschiedliche Zellgeometrien angepasst werden kann. Die Schnittkanten der Elektroden müssen gratfrei sein, um eine Zerstörung der Separatorfolie zu vermeiden. Auch eine Beschädigung der Elektroden durch einen zu hohen Wärmeeintrag oder Spritzer ist zu vermeiden. Das ausgewählte Trennverfahren sollte darüber hinaus in ein eine ganzheitliche Montageanlage integriert werden können.

Sowohl das Laserstrahlschneiden mit gepulsten Lasern als auch das Schneiden mit cw-Lasern hoher Brillanz eröffnet die Möglichkeit, die Nachteile des Stanzens zu überwinden, häufig bei gleichzeitiger Steigerung der Bearbeitungsgeschwindigkeit. Im Projekt sollen alternative Möglichkeiten des Trennens mittels Laserstrahl aufgezeigt und hinsichtlich der Erfüllung der Qualitätsanforderungen und der Kostenstruktur bewertet werden. Darauf aufbauend ist ein laserbasiertes Trennsystem in ein durchgängiges Materialflusskonzept zu integrieren, beginnend beim Abrollen der Separatoren und der Elektroden bis hin zur Stapelung der vereinzelten Folien. Das Trennmodul wird im Trockenraum installiert und unter realen Produktionsbedingungen (Taktzeit, Luftfeuchte usw.) erprobt.

Die in aktuellen Produktionssystemen durchgeführte Zwischenlagerung von Separator-, Kathoden- und Anodenfolien in Magazinen führt im Allgemeinen dazu, dass der Zellstapelung ein zeitaufwändiger Vereinzelungsprozess vorangestellt werden muss. Dadurch können Anforderungen an die Taktzeit nicht erfüllt und die geforderten Stückzahlen nicht erreicht werden. Einer der Kernaspekte des Gesamtprojekts ist der Aufbau eines integrierten Montagesystems für Lithium-Ionen-Zellen. Dies erfordert ein ganzheitliches Konzept für Anlagensteuerung und Verkettung sowie klare Schnittstellendefinitionen noch bevor einzelne Prozessmodule entwickelt und umgesetzt werden. Außerdem müs-

sen Aspekte der Arbeitssicherheit betrachtet und adäquate Rahmenbedingungen für den Aufbau eines solchen Produktionssystems geschaffen werden. Im Projekt wird ein Handhabungskonzept für die Anoden-, Kathoden- und Separatorfolien erarbeitet. Der besondere Fokus liegt hierbei auf der Durchgängigkeit der Handhabung von der Rolle bis zum fertig fixierten Stapel, ohne die Notwendigkeit der Magazinierung und Zwischenlagerung der Folien. Dazu erfolgt die Integration der Handhabungstechnik in das ganzheitliche Montagesystem.

Fachleute gehen davon aus, dass sich zukünftige Fahrzeugkonzepte durch die neuen Antriebskonzepte (Elektromotor + Energiespeicher) in ihrem Design deutlich von den heutigen Fahrzeugen unterscheiden werden. Im Hinblick auf maximalen Raumgewinn im PKW, gutes Fahrverhalten und höchste Sicherheitsanforderungen könnten zukünftig LIZ-Module mit geometrisch unbestimmter Form (Freiform) erforderlich sein. Zur Aufdeckung noch vorhandener Defizite und zur Ableitung notwendiger weiterführender Untersuchungen innerhalb der Gesamtprozesskette ist der Einfluss von Tragstrukturen komplexer Geometrien auf die Formgebungs- und Integrationstechnologie von LIZ-Modulen zu untersuchen. Unter besonderer Berücksichtigung künftiger konzeptioneller Ausbaustufen sind die erweiterten komplexen Einsatzanforderungen zu erfassen und konstruktiv-technologische Zielvorgaben an LIZ-Module mit geometrisch unbestimmter Zellform zu definieren. Hierbei sind auch Vorgaben hinsichtlich der erforderlichen Zellformen und des vorgesehenen Energiemanagements zu erarbeiten.

Die effiziente und großserientaugliche Fertigung von Lithium-Ionen-Zellen enthält drei fügetechnische Herausforderungen, die noch nicht zufriedenstellend gelöst sind:

- das Verbinden von jeweils vielen übereinanderliegenden Folien aus Aluminium bzw. Kupfer
- die Sicherung der Langzeitdichtheit der Verbindung zwischen der äußeren Kunststofffolie mit den Kontaktfahnen
- und das Verbinden der aus einem Aluminium- bzw. Kupfer-Stab bestehenden Zellverbinder miteinander.

Im Rahmen dieses Teilprojektes ist zu untersuchen, ob die Prozesssicherheit durch Laserstrahlschweißen mit Festkörperlasern höchster Strahlqualität (an Stelle des Ultraschallschweißens) verbessert werden kann und inwieweit die Übergangswiderstände sinken. Zur Verbesserung der Dichtheit und Langzeitstabilität sollen im Rahmen des Arbeitspaketes die Haftfestigkeit und die Benetzung des Polypropylens mittels Oberflächenaktivierungsverfahren verbessert werden. Mit einem für die Werkstoffpaarung neu zu entwickelnden Fügeverfahren, dem Laserinduktionswalzplattieren, soll ein stoffschlüssiges thermisches Fügeverfahren mit ausreichend großer Anbindungsfläche und geringerem Übergangswiderstand für Zellverbinder entwickelt werden.

Die Qualität der einzelnen Prozesse bei der Herstellung von Lithium-Ionen-Zellen hat einen starken Einfluss auf die Qualität der fertigen Zellen sowie auf den Ressourcenverbrauch bei der Fertigung. Für viele Prozesse fehlen bisher geeignete Maßnahmen zur Qualitätssicherung sowie die Aufnahme relevanter Daten, weshalb keine Aussage über die Qualität und den Ressourcenverbrauch während der Herstellung gemacht werden kann. In dem Arbeitspaket werden die notwendigen Maßnahmen zur prozessübergreifenden Qualitätssicherung in den Schneid-, Schweiß- und Handhabungsvorgängen identifiziert und konzipiert.

4 Die Vision von DeLIZ

Alle im Forschungsprojektes DeLIZ tätigen Wissenschaftler und Techniker hatten die Vision, kurzfristig Kostensenkungspotenziale für eine qualitätsgesicherte, großserientaugliche und somit weltweit konkurrenzfähige Zell-Fertigung aufzuzeigen. Es galt, die gesamte Prozesskette zu betrachten **(Bild 1)** und hochproduktive Technologien zu entwickeln, die schnell in die Fertigung überführbar sind. Basis aller Zielstellungen waren konkrete Zielgrößen für die Herstellung von Lithium-Ionen-Zellen und Lastenhefte für die einzelnen Prozessschritte. Sie wurden von den Projekt begleitenden Industriepartnern definiert bzw. erstellt.

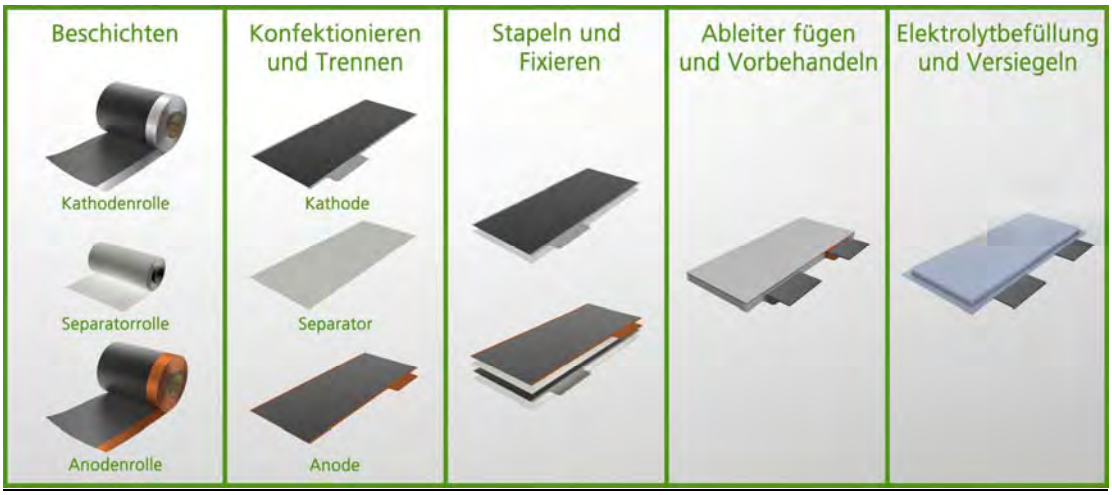


Bild 1 **Prozesskette zur Herstellung von Lithium-Ionen-Zellen**

Bei der Elektrodenbeschichtung werden Wege für eine effizientere Prozessierung durch neue Trocknungstechniken aufgezeigt. Durch Einsatz brillanter Laser können die Elektroden und Separatoren mit Geschwindigkeiten im Bereich von bis zu mehreren Metern pro Sekunde geschnitten werden. Neben den im Vergleich zum Stanzen kürzeren Schneidzeiten und eingesparten Werkzeugkosten spricht die hohe Flexibilität in der auszuschneidenden Halbzeugkontur für den Einsatz des Lasers zum Trennen der Materialien. Geeignete Software wird den Anwender in die Lage versetzten, Bauteile mit hoher Prozesssicherheit auf Basis hinterlegter Prozessdaten zu schneiden.

Für die automatisierte Fertigung von geometrisch bestimmten Zellformen (Stapel, Rollen) sind Konzepte zu erarbeiten und vollständige Montagelinien ganzheitlich zu planen. Die für die Umsetzung der Montagelinie notwendige Systemtechnik ist zu konstruieren und umzusetzen. Dabei wird von vornherein ein modulares, erweiterbares Anlagenkonzept verfolgt. Eine Magazinierung oder Zwischenlagerung der Anoden-, Kathoden- und Separatorfolien entfällt optimalerweise. Zur Handhabung sollen speziell entwickelte Endeffektoren Anwendung finden. Im Ergebnis des Projektes entsteht eine Anlage, die eine automatisierte Stapelung und Fixierung der Zellen ermöglicht. Der Aufbau einer voll verketteten Anlage zur Zellmontage erfolgt in einem hinsichtlich Größe und Trocknungskapazität geeigneten Trockenraum.

Im Hinblick auf zukünftige Fahrzeugkonzepte sind auch für die Fertigung von geometrisch unbestimmten Zellformen (Freiform) Konzepte zu erarbeiten und Montagelinien ganzheitlich zu planen. Ziel des Projektes ist die Abbildung der Prozesskette von der Formgebung bis zur Montage von konturangepassten LIZ-Modulen und die Erarbeitung eines Grobentwurfs für die Integration von LIZ-Modulen in Tragstrukturen komplexer Geometrien.

Fügetechnische Herausforderungen, die noch nicht zufriedenstellend gelöst sind, werden im Projekt ausführlich untersucht und einer industrietauglichen Lösung zugeführt. Im Ergebnis des DeLIZ-Projektes existiert ein neues prozesssicheres Verfahren zur Verbindung der Einzelfolien untereinander sowie mit der Kontaktfahne. Es gewährleistet geringere elektrische Übergangswiderstände als Ultraschallschweißen und vermeidet eine mechanische Schädigung der dünnen Folien. Maßnahmen und verfahrenstechnische Weiterentwicklungen, die die Zuverlässigkeit, Belastbarkeit und Alterungsbeständigkeit gekapselter LIZ wesentlich verbessern helfen, werden aufgezeigt. Zudem werden industrietaugliche Lösungen für die im gesamten Bereich der Elektromobilität wichtigen stoffschlüssigen Fügeverbindungen zwischen Kupfer und Aluminium erarbeitet.

Mit Abschluss des Projektes sollen für alle relevanten Prozessschritte Maßnahmen zur Qualitätssicherung beschrieben und beispielhaft im integrierten Montagesystem umgesetzt werden. Durch die Erfassung aller relevanten Daten sind Konzepte zur Minimierung des Ressourcenverbrauchs und Maximierung der Qualität möglich.

Die im Rahmen des Projektes entstehenden Lösungen und Demonstratoren für das Beschichten, Trennen, Handhaben, Stapeln, Fixieren und Fügen von Folien sowie die Prozessüberwachung sollten allgemeingültige Lösungen für eine Vielzahl von Applikationen darstellen. Damit ist eine breite Nachnutzung der Erkenntnisse gesichert und die wissenschaftlichen Erkenntnisse können direkt in die Ausbildung von Naturwissenschaftlern und Ingenieuren einfließen.

5 Ergebnisse des Forschungsprojektes DeLIZ

5.1 Energieeffiziente Elektrodenbeschichtung im Rolle-zu-Rolle-Verfahren

Beschichtungsversuche und Untersuchungen zum Trocknungsprozess
Innovativer Ansatz der Beschichtungsversuche war der Einsatz von Wasser als Lösungsmittel. Die Einsparung des organischen Lösungsmittels eröffnet ein großes Potenzial zur Kosteneinsparung durch einen vereinfachten Beschichtungsprozess, sowie Reduktion von Lösungsmittelemissionen und damit verbundenen Gefahren, Umweltbelastungen und Kosten.

Im Projektzeitraum wurden zunächst Beschichtungsversuche mit einem automatischen Tischrakelgerät der Firma BYK durchgeführt. Für die Versuche wurden die Slurries zunächst per Hand im Achatmörser und später in einer Mörsermühle der Fa. Fritsch (PULVERISETTE 2) hergestellt. Die Mahlzeiten betrugen per Hand ca. 5 min, per Mörsermühle 20 - 40 min. Die verwendeten Materialien sind in **Tabelle 1** zusammengefasst.

Tabelle 1 **Übersicht der verwendeten Materialien**

Binder	**Info**	**Bezug**
SBR	Styrene Butadiene Rubber, 15 %-ige wässrige Dispersion	Targray
CMC	Carboxymethylcellulose, 5 %-ige wässrige Lösung	
PTFE	Teflon, 60 %-ige wässrige Dispersion	
Aktivmaterial		
MCMB	Mesophasengraphit, kuglige Partikel, ca. 25 - 50 µm Durchmesser	Litarion
$LiFePO_4$ P1	kohlenstoffbeschichtetes Lithiumeisenphosphat „Lifepower", Partikelgröße (D50) 2 - 4 µm	Phostech / Südchemie
$LiFePO_4$ P2	kohlenstoffbeschichtetes Lithiumeisenphosphat „Lifepower", Partikelgröße (D50) 0,5 - 1 µm	Phostech / Südchemie
Leitruß	Timcal Super 65	Timcal
Folien		
Kupfer 25 µm	glatt	Alfa Aesar
Kupfer 10 µm	glatt	Litarion
Kupfer 10 µm	beidseitig geätzt + Cu-Nanopartikelschicht	Schlenk
Aluminium 20 µm	beidseitig kohlenstoffbeschichtet	Hohsen/ Japan
Aluminium 20 µm	beidseitig kohlenstoffbeschichtet	Litarion

Tabelle 2 stellt die Zusammensetzung der Slurries für die **Anodenherstellung** dar.

Tabelle 2: **Zusammensetzung der Anodenelektroden**

Anode				
Probe	**MCMB**	**SBR**	**CMC**	**Feststoffgehalt des Slurry**
DeLiZ_1	98,0 %	2,0 %		73,0 %
DeLiZ_2	97,0 %	3,0 %		73,3 %
DeLiZ_3	96,0 %	4,0 %		73,0 %
DeLiZ_4	97,0 %	1,5 %	1,5 %	93,4 %
DeLiZ_5	96,0 %	2,0 %	2,0 %	91,5 %

Als Aktivmaterial wurde Mesophasengraphit-Pulver eingesetzt. Auf Basis einer Literaturrecherche wurden Styrol-Butadien-Kautschuk (SBR) und Carboxymethylzellulose (CMC) als aussichtsreiche Binder evaluiert. Als Substratfolie diente 25 µm Kupferfolie von Alfa Aesar sowie von der Firma Litarion.

Die Nassschichtdicke wurde am Spaltrakel auf 100 µm eingestellt. Mit allen sechs Zusammensetzungen der Bindervariation konnten homogene und gut haftende Beschichtungen aufgetragen werden. Die Trocknung fand bei Raumtemperatur an Laborluft statt. Dabei schrumpfte die Schichtdicke um 10 bis 20 %. REM-Aufnahmen der Anodenelektroden (**Bild 2 und 3**) zeigen eine gleichmäßige Verteilung von Binder und Aktivmaterial sowie eine gute Anbindung an das Substrat. Die Oberfläche erscheint glatt mit Poren.

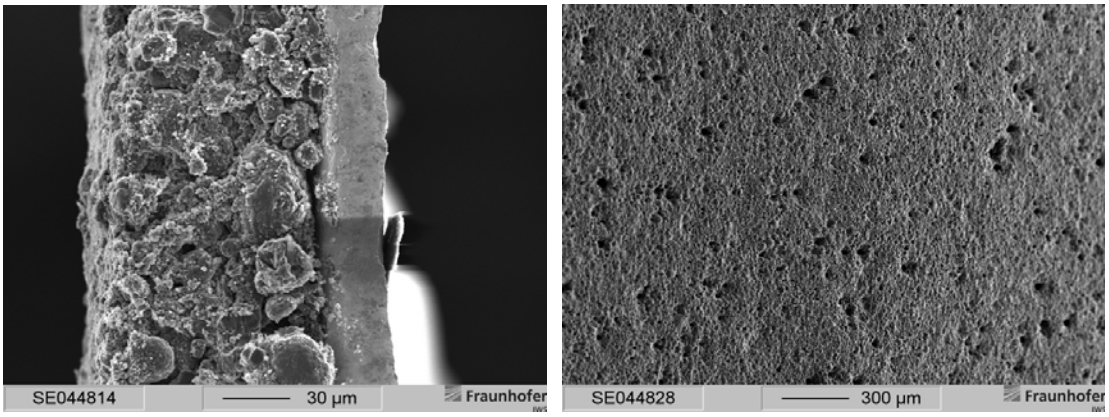


Bild 2: **REM-Aufnahme der Anodenelektrode (Probe DeLiZ_2): links: Schnittkante; rechts: Oberfläche**

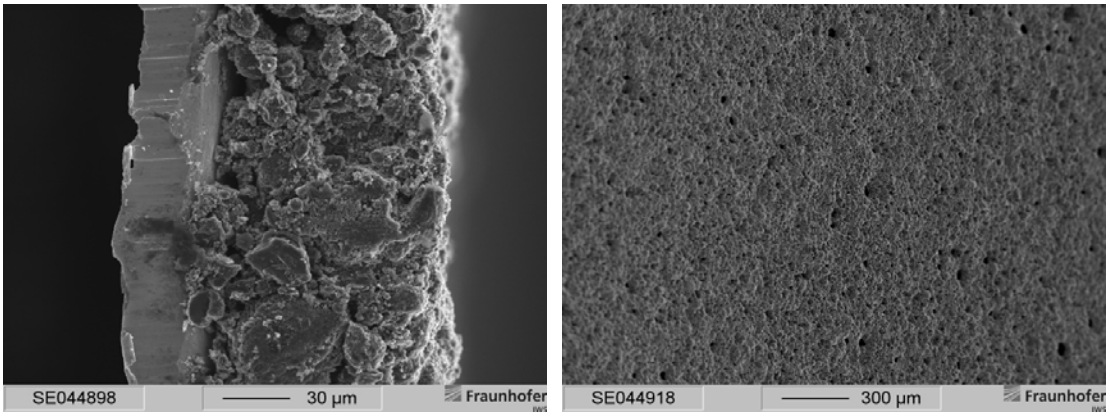


Bild 3: **REM-Aufnahme der Anodenelektrode (Probe DeLiZ_5): links: Schnittkante; rechts: Oberfläche**

Versuche unter Verwendung von PTFE-Dispersion als Binder führten zu geringer Anhaftung der Schichten an die Kupferfolie bei den Rakelversuchen. Die Arbeiten beschränken sich daher auf die Verwendung von SBR und CMC als Binder-Systeme.

Die Zusammensetzung der Slurries für die **Kathodenherstellung** zeigt **Tabelle 3**.

Tabelle 3 **Zusammensetzung der Kathodenelektroden**

Kathode				
Probe	**$LiFePO_4$ P1**	**SBR**	**CMC**	**Feststoffgehalt des Slurry**
DeLiZ_10	97,1%	2,9%		58,2%
DeLiZ_11	94,3%	5,7%		58,9%
DeLiZ_12	91,7%	8,3%		59,6%

Als Kathodenaktivmaterial wurde Lithiumeisenphosphat-Pulver (*Lifepower* P1 und P2) von der Firma Südchemie/ Phostech verwendet. Kohlenstoffbeschichtete Aluminiumfolie der Firma Hohsen wurde als Substrat für die Kathode eingesetzt.

Für eine bessere Kontaktierung der Aktivmaterial-Partikel in der gerakelten Schicht wurde Leitruß (Timcal Super 65) als Leitadditiv beigemischt. Versuche zur Verarbeitung von $LiFePO_4$-Pulvern zeigten, dass SBR ohne Zusatz von CMC ein geeigneter Binder für das Material ist.

Die Nassschichtdicke wurde am Spaltrakel auf 150 µm eingestellt. Es konnten homogene und haftende Beschichtungen aufgetragen werden. Die Trocknung fand bei Raumtemperatur an Laborluft statt. Dabei schrumpfte die Schichtdicke proportional zum Wassergehalt um 20 bis 40 %. **Bild 4** zeigt REM-Aufnahmen der Kathodenelektroden.

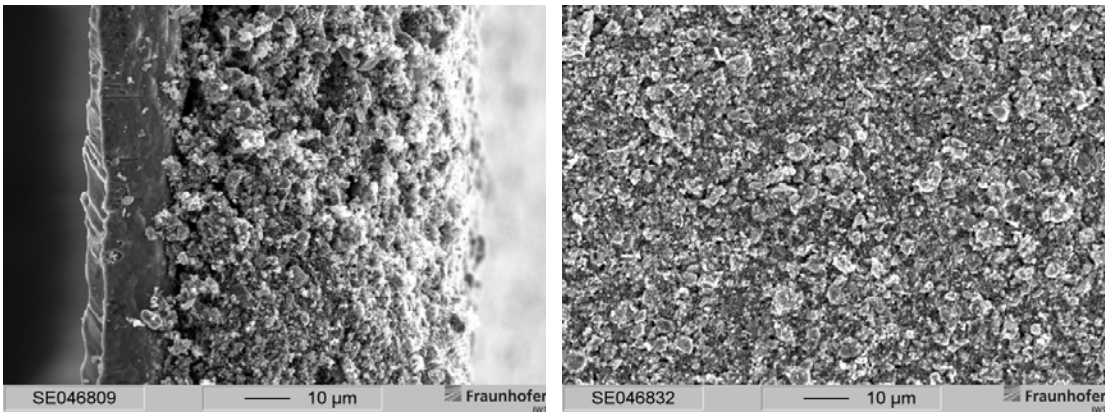


Bild 4: **REM-Aufnahme einer Kathodenelektrode (Probe DeLiZ_43, vgl. Zusammensetzung DeLiZ_11): links: Schnittkante; rechts: Oberfläche**

Standardmäßig wurden die per Tischrakel hergestellten Schichten an Laborluft bei Raumtemperatur getrocknet. Die Rolle-zu-Rolle-Beschichtungsanlage mit Umlufttrocknung stand erst im zweiten Drittel des Projektes zur Verfügung, ebenso ein Karl-Fischer-Titrator. Um dennoch den Einfluss der Temperatur auf die Trockenzeit der Schichten zu evaluieren, wurde die Restfeuchte indirekt über Laserdiodenspektroskopie (Gerät: LDS III, IWS-Eigenentwicklung) bestimmt. Dabei wurde eine frisch gerakelte Folie der Größe 5 x 10 cm² in eine temperierte und mit Stickstoff gespülte Messzelle gelegt. Das aus der Schicht ausdampfende Wasser wird durch den Stickstoff als Trägergas in die Messzelle des Laserdiodenspektrometers transportiert, wo ein NIR-Laser die Intensität der Wasserschwingungsbande misst. Messaufbaubedingt betrug die untere Messgrenze ca. 80 ppm für Wasser.

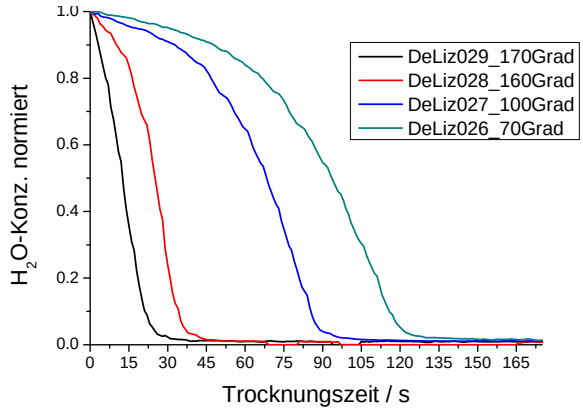


Bild 5: **Vergleich der Trockenkurven für unterschiedliche Trockentemperaturen**

Ein Vergleich der Kurven in **Bild 5** zeigte erwartungsgemäß kürzere Trockenzeiten für höhere Temperaturen. Der flache Auslauf der Kurvenverläufe deutet auf eine Feintrocknung der kleineren Poren hin.
Alternativ zur thermischen Trocknung mit Luft wurde die Trocknung mittels Mikrowellenstrahlung getestet. Hierbei sollte durch die starke Anregung der Wassermoleküle das

in der Nassschicht vorhandene Wasser schnell verdampft werden. Zur Verfügung stand eine handelsübliche Haushaltsmikrowelle (2,45 GHz; 700 W). Da die Mikrowellenantennen im Rahmen des Projektes nicht an die Geometrie der metallischen Substratfolie angepasst werden konnten, wurden zur Vermeidung von Funken und Überschlägen polymere Substrate (5 x 10 cm²) verwendet.

Aufgerakelt wurden Graphitschichten mit ca. 3 % SBR-Binder. Im Versuch auf der untersten Leistungsstufe für ca. 10 s kam es zu einer sichtbaren Trocknung der Nassschicht. Allerdings war die Schicht nach der Trocknung deutlich aufgeraut, was auf mikroskopische Risse und Aufplatzungen aufgrund der schnellen Wasserverdunstung zurückgeführt werden kann. Die mikrowellengetrocknete Schicht (**Bild 6**) weist eine lockere Struktur auf und ist an mehreren Stellen delaminiert.

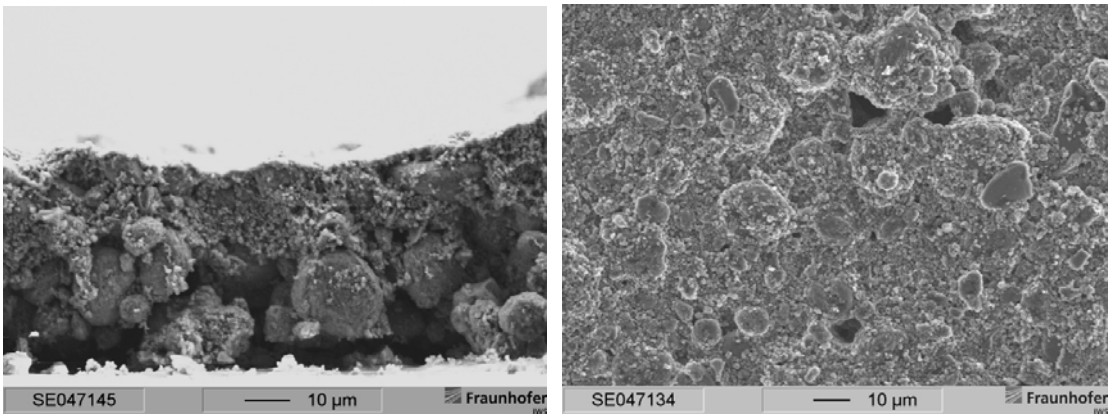


Bild 6: **REM-Aufnahme einer mikrowellengetrockneten Schicht links: Schnittkante; rechts: Oberfläche**

Untersuchungen zur Haftungsverbesserung von Elektroden

Die Vorbehandlung der Folien zeigte, aufgrund der generell guten Schichthaftung, keine Verbesserung der Haftung. Das wurde anhand von Haftfestigkeitstest und elektrochemischen Tests festgestellt. Generell ließen sich alle beschichteten Folien mehrfach um kleine Radien (z. B. 2 cm) biegen, ohne dass Abplatzungen oder Knicke in der Aktivschicht beobachtet werden konnten.

Einzig Anodenschichten mit dem Leitadditiv (10 Gew.-%) auf der Kupfer-Folie der Fa. Schlenk zeigten bei Versuchen an der Rolle-zu-Rolle-Anlage für einige Parameter deutliche, teilweise flächige Abplatzungen. Hier führte der teilweise Ersatz des Binders SBR durch CMC zu einer Verbesserung der Haftung (**Tabelle 4**).

Tabelle 4: **Einfluss der Leitadditivs und des Binders auf die Haftung**

Aktivmaterial	Binder	Haftung	Risse
MCMB	3 % SBR	gut	nein
MCMB + Leitruß	3 % SBR	schlecht	ja
MCMB + Leitruß	1,5 % SBR + 1,5 % CMC	gut	teilweise

Eine mögliche Ursache für die schlechte Haftung der Anodenschicht auf der elektrochemisch geätzten Kupferfolie ist eventuell die schlechtere Benetzbarkeit und Kontaktierung der Schichtpartikel und der rauen Kupferfolie. Für den Einsatz von Leitruß musste der Wasseranteil im Slurry deutlich erhöht werden, wodurch sich ebenfalls die Schrumpfung der Schicht während der Trocknung erhöht. Der Einsatz von CMC führt hier zu einer besseren Elastizität und Anbindung der funktionalen Schicht.

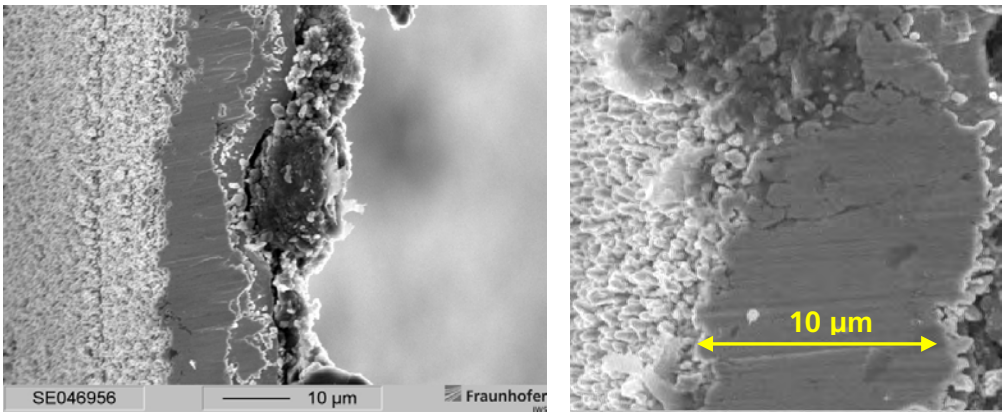


Bild 7: **REM-Aufnahme: geätzte Kupferfolie der Fa. Schlenk: (links: Übersicht, rechts: Detail)**

Rolle-zu-Rolle-Beschichtung

Die Rolle-zu-Rolle-Beschichtungsanlage wurde durch die Fa. JWS GmbH gebaut und im IWS installiert (**Bild 8**). Die komplett explosionsgeschützte Anlage verfügt über ein Slurry-auftragsystem durch ein Kommarakel mit Übertragswalze. Die bis zu 28 cm breite Folie kann mit Geschwindigkeiten von 0,6 – 6 m/min gefahren werden. Die dreistufige Umlufttrocknungsstrecke kann eine Luftmenge von 1000 m³/h bis zu 200 °C temperieren. Im Hinblick auf die thermische Belastbarkeit der polymeren Binder wurde als maximale Trocknungstemperatur 100 °C gewählt.



Bild 8: **Rolle-zu-Rolle-Beschichtungsanlage der Firma JWS im Fraunhofer IWS; links im Bild: Aufrakeleinheit mit Übertragswalzen; rechts: 3-stufige Umlufttrocknungszone mit Aufwickeleinheit**

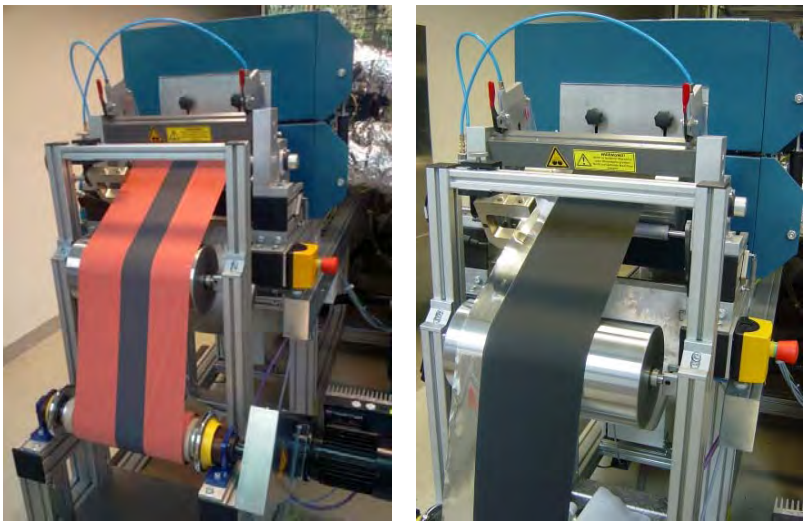


Bild 9: **Elektrodenherstellung im Fraunhofer IWS; links: Anode; rechts: Kathode**

Anodenherstellung:
Für die Rolle-zu-Rolle-Anlage wurden alle Slurries in der Mörsermühle hergestellt. Zunächst erfolgten Beschichtungsversuche der Anodenseite unter Verwendung von Kupferfolie der Fa. Schlenk. Für die Übertragbarkeit der am Tischrakel erprobten Slurries war deren Viskosität jedoch zu hoch. Es konnte kein kontinuierlicher Nassfilm auf die Folie abgeschieden werden. Der Nassfilm riss periodisch ab, was zu der Erzeugung einer Art Zebrastreifenmusters führte.

Eine Erniedrigung der Viskosität durch mehr Wasser im Slurry ermöglichte die Abscheidung gut haftender, aber rauer Graphitschichten (**Bild 9**). Die Temperatur des Trockenprozesses hatte hier keinen sichtbaren Einfluss. Um die für bessere Leitfähigkeit zugegebenen Ruße im Slurry zu dispergieren zu können, musste der Wasseranteil stark erhöht werden. Diese Nassschichten mit einem Wasseranteil von ca. 60% konnten gleichmäßig aufgetragen werden, zeigten jedoch nach der Trocknung Risse und wenige kleine Abplatzungen. Der Zusatz von CMC verbesserte die Haftung und verminderte die Rissbildung (**Tabelle 5**).

Tabelle 5: **Einfluss der Slurryzusammensetzung auf die Trockenschicht**

Probe	MCMB	Leitruß	SBR	CMC	Feststoffgehalt des Slurry	Schicht
DeLiZ_30	97 %		3 %		73 %	Zebrastreifen
DeLiZ_44	97 %		3 %		64 %	rau, gute Haftung
DeLiZ_60	87 %	10 %	3 %		40 %	teilweise schlechte Haftung, Risse, Abplatzung
DeLiZ_66	88 %	10 %	1,5 %	0,5 %	38 %	gute Haftung, glatte Oberfläche

Kathodenherstellung
Die im Rolle-zu-Rolle-Verfahren verwendete Aluminiumfolie wurde von der Fa. Litarion zur Verfügung gestellt. Wie schon auf der Anodenseite musste auch hier durch Erhöhung des Wasseranteils die Viskosität des Slurries erniedrigt werden. Größere Abplatzungen der Aktivschicht wurden nicht beobachtet (**Bild 9**). Allerdings kam es vereinzelt zum Auftreten von Schichtrissen, was auch hier auf die hohe Schrumpfung zurückzuführen sein könnte. Die auf Anodenseite beobachtete rissmindernde Wirkung von CMC als Binder konnte hier bis zum Abschluss des Projektes nicht getestet werden.

Dagegen wurde an getrockneten Folien eine flächige Oberflächenstruktur mit flachen, kreisförmigen Unebenheiten beobachtet werden. Diese Struktur konnte auf das Auftreten von kleinen Luftbläschen im aufgerakelten Nassfilm zurückgeführt werden. Die Luftblasen werden vor allem während des Vermischens des Slurryanteile im Mörser eingebracht. Eine Entgasung des fertigen Slurries wurde versuchsweise durch eine Kombination aus Ultraschallbehandlung und Vakuumabsaugung, sowie durch schlichtes Stehenlassen des Slurries über mehrere Stunden durchgeführt. Während ersteres zu keiner reproduzierbaren Verbesserung führte, konnten mit Slurries, bei denen Luftblasen durch Stehenlassen für ca. 20 h ausgetreten waren, glatte Schichten ohne Unebenheiten hergestellt werden (**Tabelle 6**).

Tabelle 6: **Einfluss der Slurryzusammensetzung auf die Trockenschicht**

Probe	$LiFePO_4$ P1	Leitruß	SBR	Feststoffgehalt des Slurry	Entgasung	Schicht
DeLiZ_74	85 %	10 %	5 %	39 %	-	Rau, uneben, haftfest, teilweise Risse
DeLiZ_76	84 %	9 %	7 %	35 %	-	Risse, haftfest
DeLiZ_80	85 %	10 %	5 %	39 %	US, Unterdruck	Rau, uneben, haftfest
DeLiZ_81	85 %	10 %	5 %	39 %	Stehenlassen für 20 h	glatt, haftfest, homogen

Restfeuchte-Bestimmung mittels Karl-Fischer-Titration

Gegen Ende des Projektzeitraumes stand zur Restfeuchte-Bestimmung der Schichten ein Karl-Fischer-Titrator zur Verfügung. Im Titrator der Fa. Analytik Jena wurde während der Messung die Probe mit 150 °C ausgeheizt. Die an der Rolle-zu-Rolle-Anlage hergestellten Schichten wurden so schnell wie möglich, maximal innerhalb von 10 min versiegelt. In Abhängigkeit von der Bandgeschwindigkeit der Substratfolie zeigte sich eine Erniedrigung der Restfeuchte hin zu langsameren Bandgeschwindigkeiten (**Bild 10**).

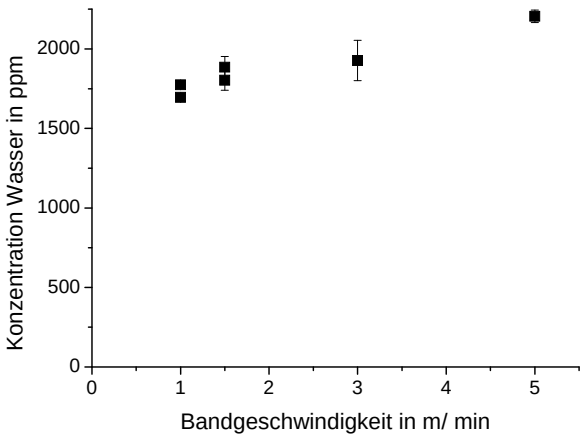


Bild 10: **Restfeuchtemessung mit dem Karl-Fischer-Titrator: Proben DeLiZ 49 – 54 (Variation der Bandgeschwindigkeit)**

Die Restfeuchte betrug für alle in der Rolle-zu-Rolle-Beschichtungsanlage getrockneten Schichten (Anode, Kathode) zwischen 1500 und 2000 ppm. Die Trockentemperatur wurde nur geringfügig zwischen 60 °C und 80 °C variiert. Anhand der Restfeuchtebestimmung konnte kein Einfluss der Temperatur bei dieser kleinen Variation festgestellt werden. Während der Aktivierung der Proben im Vakuumofen (bei 80 °C), wie sie für die elektrochemische Charakterisierung nötig ist, sank die Restfeuchte auf minimal 550 ppm.

Kalandrierversuche

Im Rahmen des Projektes wurde ein Kalander der Fa. JWS beschafft, aufgebaut und in Betrieb genommen (**Bild 11**). Das Gerät ist für eine Folienbreite bis zu 300 mm und eine Presskraft von 250 kN ausgelegt.



Bild 11: **Kalander im Fraunhofer IWS; links: Übersicht; rechts: obere Presswalze und Auflagetisch**

Verschiedene Proben wurden nach der Beschichtung und Trocknung in der Rolle-zu-Rolle-Anlage durch Kalandrieren verdichtet und verfestigt. Da die Dickenabnahme durch das Kalandrieren nur zwischen 10 und 30 % liegt, kann von einer relativ dichten Schicht bereits nach der Beschichtung ausgegangen werden. Die kalandrierten Schichten waren gegenüber unkalandrierten Schichten mechanisch fester, bei gleich guter Haftung. Die Oberfläche wurde sichtbar geglättet (**Bild 12**).

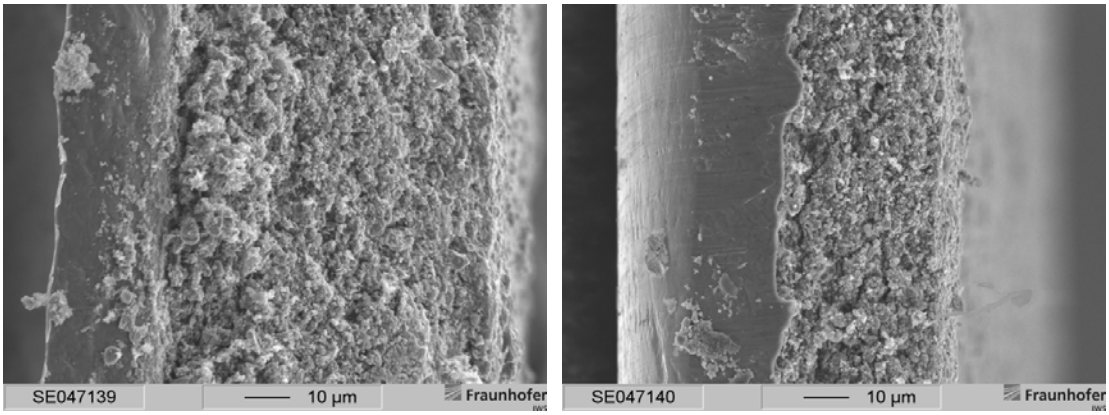


Bild 12: **REM Aufnahme der Probe DeLiZ_81 (Schnittkante):**
links: unkalandriert; rechts: kalandriert (ca. 30 % Schichtdickenabnahme)

Elektrochemische Charakterisierung der Elektroden

Die elektrochemischen Messungen wurden an einen Potentiostat der Fa. Ivium durchgeführt. Die Messzelle war eine Standard-Swagelok-Zelle. Die Elektroden wurden gegen Li-Metall in einer 2-Elektrodenanordnung gemessen.

Anode:

Die im ersten Zyklus gemessenen Kapazitäten von ca. 270 mAh/g sind mit Werten aus der Literatur vergleichbar. Der irreversible Teil der Kapazität des ersten Ladens beträgt 15 %. Mehrere Zyklen bei verschiedenen Lade- und Entladeraten zeigen eine Abnahme der Kapazitäten. Ein Grund hierfür könnte Restfeuchte in der Schicht sein. Der erste Ladezyklus mit 0,2 C zeigt die typische Schulter für die SEI-Schichtbildung (**Bild 13**).

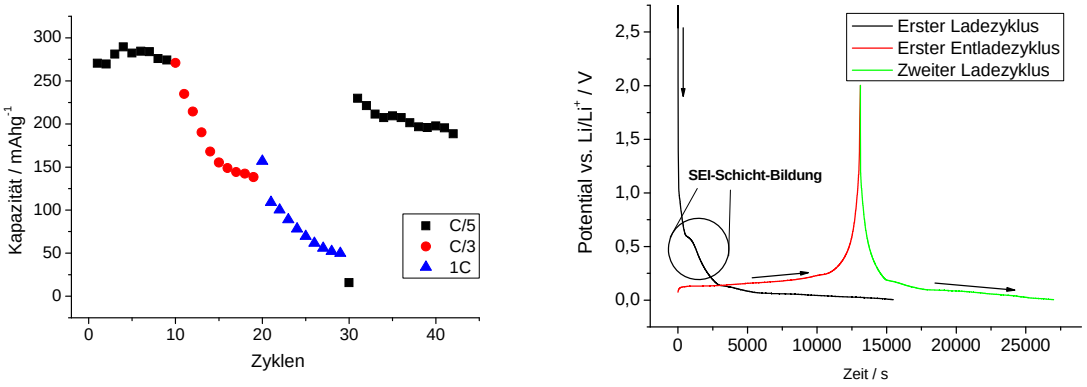


Bild 13: **Elektrochemische Eigenschaften der Probe DeLiZ_24 (87 % MCMB, 10 % Leitruß, 3% SBR) links: Kapazitäten für verschieden C-Raten; rechts: Lade- und Entladekurve**

Kathode:

Bei niedrigen Lade- und Entladeraten entsprechen die Kapazitäten denen, die der Hersteller angibt (140 mAh/g für *LifePower* P1). Die Lade- und Entladekurven zeigen die für $LiFePO_4$ typischen Charakteristika. Das Ladeplateau liegt bei ca. 3,5 V und Entladeplateau bei ca. 3,3 V. Die Elektrode ist über 30 Zyklen in der Halbzellenkonfiguration stabil. In **Bild 14** ist als Beispiel die Kapazitäten während der Zyklierung sowie Lade- und Entladekurven der Probe DeLiZ_21 dargestellt.

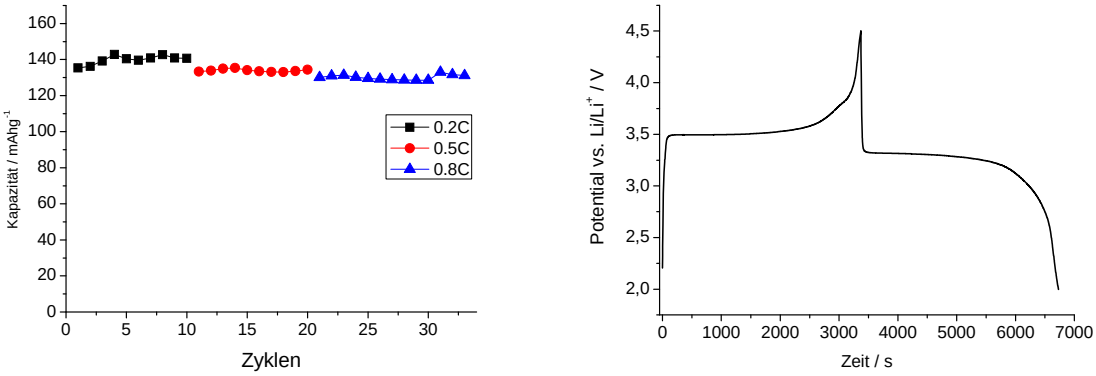


Bild 14: **Elektrochemische Eigenschaften der Probe DeLiZ_21 (87 % $LiFePO_4$ P1, 10 % Leitruß, 3 % SBR): links: Kapazitäten für verschieden C-Raten; rechts: Lade- und Entladekurve**

Aus den Experimenten zur Rolle-zu-Rolle-Beschichtung wurden die Proben DeLiZ_72 und 73 elektrochemisch in einer Halbzelle gegen Li-Metall charakterisiert. Beide Proben zeigen ein stabiles Zyklierverhalten und selbst bei hohen Laderaten bis 16 C bleibt die Funktionsweise erhalten.

Im Vergleich (**Bild 15**) schneidet die Probe mit höherem CMC:SBR-Verhältnis (DeLiZ_73) deutlich besser ab. Hier werden bei 0,2 C Kapazitäten von über 140 mAh/g erreicht und bei 16 C bleibt noch 1/3 der Kapazität nutzbar. Bei der Probe 72 hingegen liegen die Kapazitäten bei 0,2 C unter 130 mAh/g und bei 16 C sinkt die nutzbare Kapazität auf kleiner 20 mAh/g. Die bessere Performance der Probe 73 korreliert auch mit der Beobachtung, dass die Schichthaftung und -elastizität durch den Zusatz von CMC als Binder verbessert wird.

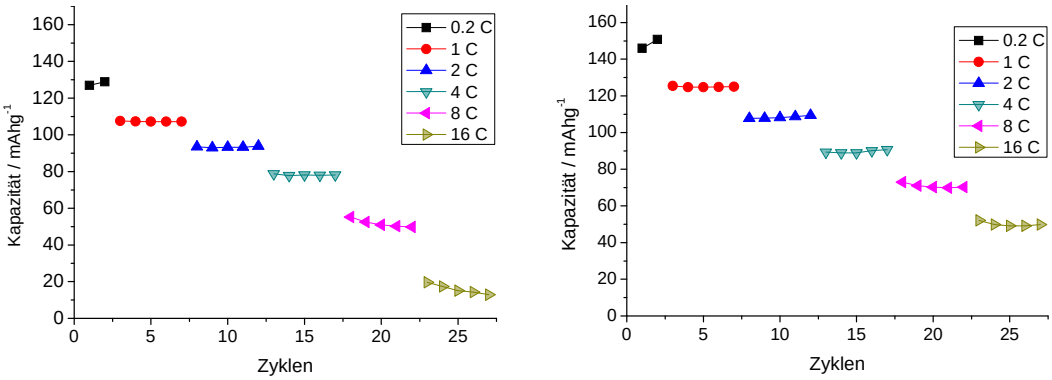


Bild 15: **Vergleich der Kapazitäten bei unterschiedlichen C-Raten: links: DeLiZ_72; rechts: DeLiZ_73**

Einfluss des Leitruß-Gehaltes

Anhand der Lade-und Entladekurven ist der Einfluss des Leitrußes deutlich sichtbar (**Bild 16**). Der höhere Anteil des Leitadditivs führt zu einer höheren Nutzung des Aktivmaterials und damit zu höheren spezifischen Kapazitäten. Außerdem ist die Polarisierung der Elektroden bei hohen Laderaten bei höherem Anteil von Leitruß deutlich geringer, d.h. es werden höhere Coulomb-Effizienzen erreicht (**Bild 17**).

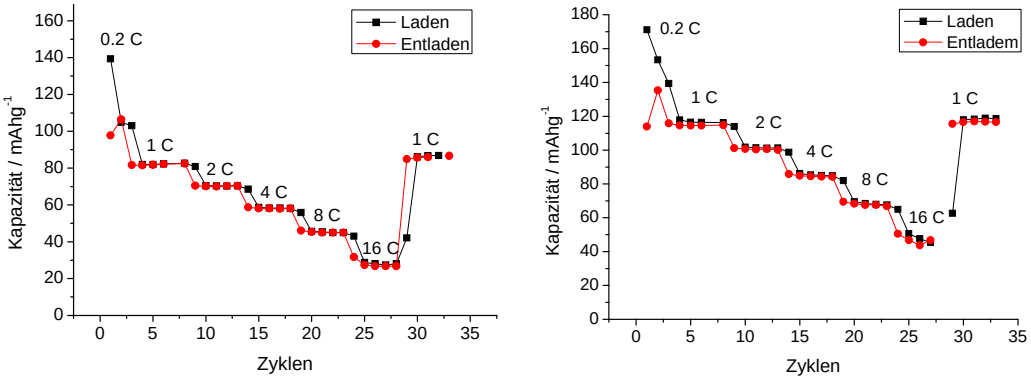


Bild 16: **Vergleich der Kapazitäten bei unterschiedlichen C-Raten: links: 5 % Leitruß; rechts: 10 % Leitruß**

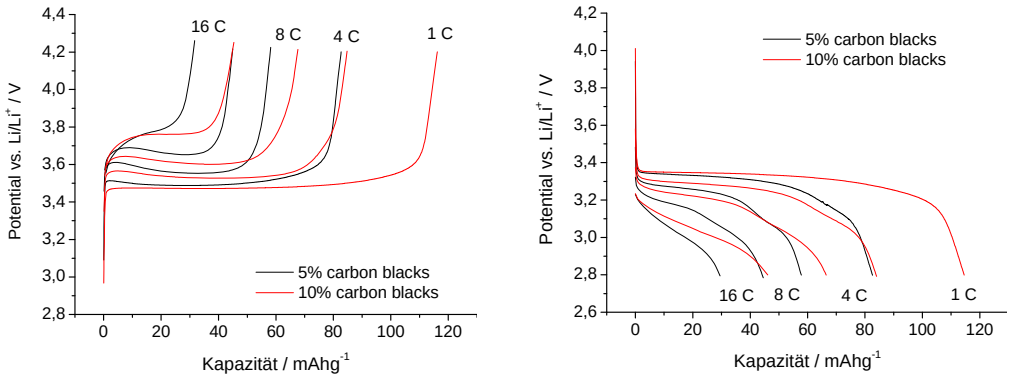


Bild 17: **Lade- (links) und Entladekurve (rechts) der Kathode für unterschiedliche C-Raten und Leitruß-Gehalte**

Fazit

Im Projektzeitraum wurden Arbeiten und Recherchen zur Herstellung und Verarbeitung von Rezepturen für Anoden- und Kathodenmaterialien durchgeführt. Am Tischrakel wässrig hergestellte Elektroden zeigen vielversprechende Eigenschaften. Nach Aufbau einer Rolle-zu-Rolle-Beschichtungsanlage wurden die vorab gewonnenen Erkenntnisse auf den Durchlaufprozess übertragen und notwendige Anpassungen im Verfahren und in den Rezepturen durchgeführt. Die Charakterisierung umfasste vor allem strukturelle Analyse, Restfeuchtebestimmung und elektrochemische Kapazitäts-Messungen.

Die Kapazitäten der Elektroden sind mit Literaturwerten vergleichbar, was die Funktionsweise der wässrigen Prozessierung belegt. Der Einfluss des Leitadditivs auf Kapazität und Verarbeitbarkeit des Slurries konnte herausgestellt werden. Ansätze zur Verbesserung der Schichthaftung und Oberflächenqualität sind u. a. der Einsatz von CMC als Binder und eines Entgasungsschrittes während der Slurry-Verarbeitung.

5.2 Konfektionieren der Elektroden und Separatoren

Die im Rolle-zu-Rolle-Verfahren hergestellten Elektroden werden im nächsten Prozessschritt konfektioniert. Die bisher industriell eingesetzte Methode zum Vereinzeln der Folien ist das mechanische werkzeuggebundene Stanzen. Dieses Trennverfahren ist durch hohe Investitionskosten und einen hohen Werkzeugverschleiß gekennzeichnet. Außerdem ist ein Formatwechsel mit hohen Rüstkosten und -zeiten verbunden.

Als berührungslos arbeitendes Werkzeug bietet sich Laserstrahlung zur Substitution des mechanischen Stanzsystemes an. Laserstrahltrennverfahren sind verschleißfrei, formatflexibel und erreichen bei vergleichbaren Investitionskosten höhere Bearbeitungsgeschwindigkeiten. Für die Untersuchungen zum Laserstrahlschneiden sollten sowohl gepulste Laser als auch Strahlquellen im Dauerstrichbetrieb Verwendung finden. Darüber hinaus war die Umsetzung einer automatisierten Lasertrennanlage, die sowohl eine wirtschaftlich konkurrenzfähige Taktzeit als auch eine ausreichende Schnittqualität gewährleistet, Ziel des Projektes.

Zunächst fand eine Eignungsprüfung vorhandener und am Markt verfügbarer Laserstrahlquellen zum Sublimationsschneiden der Ausgangsmaterialien anhand der im Lastenheft definierten Anforderungen statt. Als qualitative Zielstellungen ergaben sich:

- glatte, gratfreie Schnittkanten bzw. Minimierung des Grates
- kein Überstehen des metallischen Folienmaterials entlang der Schnittkanten
- keine Abplatzungen des Beschichtungsmaterials
- keine bzw. minimale Verunreinigung der Folienoberflächen mit abgetragenem Material (Debris)

Als quantitatives Kriterium stellt sich eine effektive Schneidgeschwindigkeit von mindestens 1 m/s als Zielgröße dar.

Anhand dieser Kriterien definieren sich die Anforderungen an die zu nutzenden Laserstrahlquellen. Die Forderung nach minimalen Abplatzungen und geringster Wärmebeeinflussung des Materials entlang der Schnittkante bedingt die Nutzung möglichst fein fokussierbarer Strahlquellen und somit hohe Strahlqualitäten und kurze Wellenlängen der emittierten Strahlung. Diese Bedingungen erfüllen lediglich Grundmode-Laser mit Wellenlängen im NIR-Bereich oder kürzer (Frequenzverdopplung bzw. -verdreifachung).

Weiterhin verlangen die gewünschten Schneidgeschwindigkeiten entsprechende Laserausgangsleistungen. Sie bedingen mittlere Ausgangsleistungen für gepulste Systeme im Bereich > 10 W und Ausgangsleistungen für Dauerstrichsysteme im Bereich mehrerer 100 W. Eine genaue Quantifizierung der Werte erfolgte im weiteren Verlauf des Projektes.

5.2.1 Verfahrenstechnische Grundlagenuntersuchungen

Trennen mit gepulsten Strahlquellen

Die Untersuchungen zur trennenden Bearbeitung konzentrierten sich zunächst auf die beiden Elektrodenmaterialien Anode und Kathode. Beiden Materialien ist ihr dreischichtiger Aufbau gemein. Die Anode ist eine beidseitig mit Graphit beschichtete Kupferfolie, wohingegen die Kathode aus einer beidseitig beschichteten Aluminiumfolie besteht. Den prinzipiellen Aufbau beider Materialien skizziert **Bild 18**.

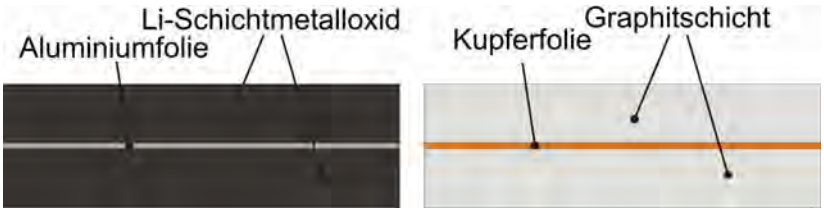


Bild 18: **Schematische Darstellung des prinzipiellen Aufbaus der Elektroden, Kathode (li.) und Anode (re.)**

Die Gesamtdicke der Kathode ist mit 130 µm gegenüber der Anode, welche 120 µm dick ist, leicht erhöht. Für beide Materialien charakteristisch ist eine relativ geringe Schichtdicke der metallischen Materialien gegenüber der jeweiligen Beschichtung. Typische Werte für die metallischen Folien umfassen einen Bereich von 10 bis 30 µm, wohingegen die Beschichtungsdicke bei insgesamt ca. 100 µm liegt.

Zum Trennen der genannten Materialien wurde zunächst ein Kurzpuls-Faserlaser mit einer Wellenlänge von 1064 nm und einer maximalen mittleren Ausgangleistung von 50 W genutzt. Entsprechend des optischen Abbildungsverhältnisses ergab sich ein Durchmesser der Strahltaille von 25 µm. Die genutzte Repetitionsrate wurde zu 50 kHz bzw. 100 kHz gewählt. Die Pulsdauer betrug ca. 100 ns. Die mit diesem System erreichten Schneidgeschwindigkeiten stellt **Bild 19** graphisch dar.

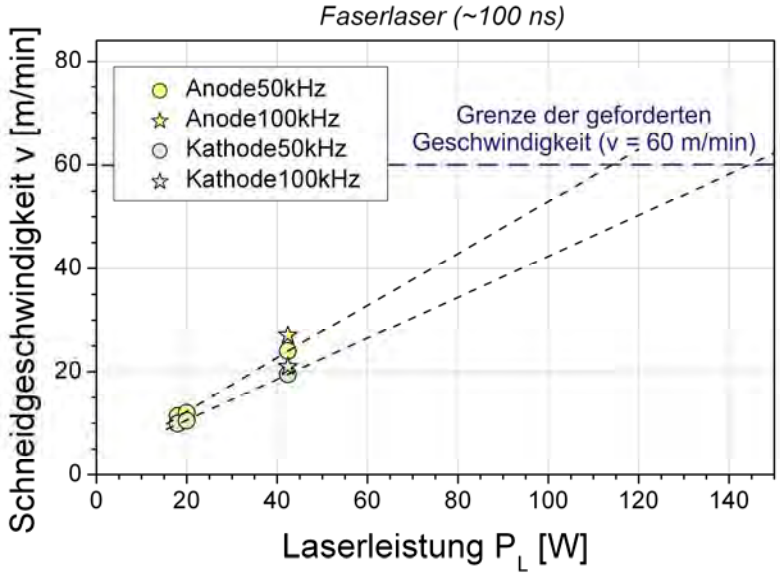


Bild 19: **Schneidgeschwindigkeiten für Anode und Kathode in Abhängigkeit von der Laserleistung, t_p = 100 ns, d_f = 25 µm**

Erwartungsgemäß steigt die erreichte Schneidgeschwindigkeit über der genutzten Laserleistung an. Die realisierten Werte bei P_L = 42,5 W liegen mit ca. 30 m/min jedoch unter der geforderten Geschwindigkeit. Eine Abschätzung der erforderlichen Laserleistung anhand der gewonnenen Daten lässt auf einen Leistungsbedarf im Bereich weniger hundert Watt schließen. Eine Laserleistung von 100 - 200 W erscheint als ausreichend, um die geforderte Schneidgeschwindigkeit von 60 m/min umsetzen zu können.

Die Untersuchungen bezüglich der Repetitionsrate zeigen eine geringfügige Erhöhung der erreichten Schneidgeschwindigkeit mit der Repetitionsrate von 100 kHz gegenüber

50 kHz sowohl beim Anoden- als auch beim Kathodenmaterial. Generell ist bei gegebener Laserleistung das Anodenmaterial mit höheren Schneidgeschwindigkeiten trennbar als das Kathodenmaterial.

Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse wurden weiterführende Untersuchungen mit einem ps-Laser durchgeführt. Die maximal genutzte Ausgangsleistung betrug ca. 40 W bei einem Durchmesser der Strahltaille von ca. d_f = 27 µm. Den prinzipiellen Versuchsaufbau mit Strahlquelle, Scan-System zur Strahlablenkung und Aufspannung des Probenmaterials gibt Abbildung 3 wieder.

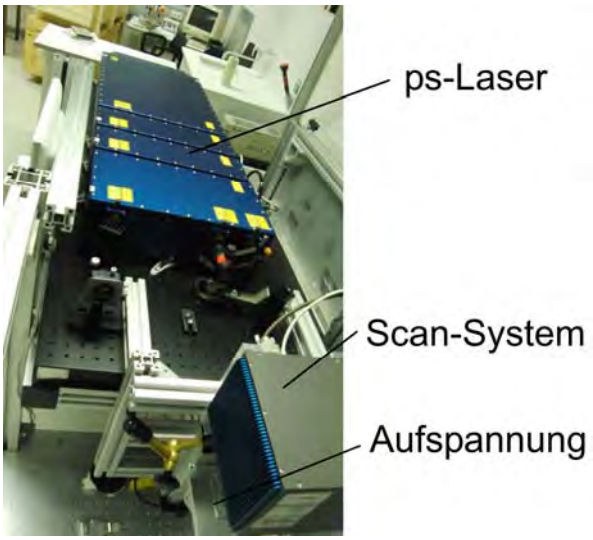


Bild 20: **Versuchsaufbau für Schneiduntersuchungen mit ps-Laser**

Die erreichten Schneidgeschwindigkeiten mit diesem System bei P_L = 40 W, d_f = 27 µm und einer Pulsdauer t_p = 12 ps betrugen 20 m/min beim Anoden- und 16,5 m/min beim Kathodenmaterial. Sie liegen damit ebenfalls unter der geforderten Geschwindigkeit. In den Untersuchungen konnte das Material im Maximum mit 27 m/min (Anodenmaterial) bzw. 20 m/min (Kathodenmaterial) getrennt werden. Dabei wurde allerdings die untere Beschichtung oft nur unsauber durchtrennt, was sich in Form von überstehenden Materialresten (Fransen) zeigt.

Beim Separator hingegen lassen sich mit diesem System bei genannter Laserleistung problemlos Schneidgeschwindigkeiten von mehr als 180 m/min erzielen. Ursache dafür ist der nichtmetallische Werkstoff und die geringe Dicke des Separators.

Da sich die Absorption der meisten Materialien bei kürzeren Wellenlängen spürbar erhöht, wurden ergänzende Untersuchungen bei einer Wellenlänge von 355 nm durchgeführt. Diese Untersuchungen erfolgten sowohl mit ns- als auch mit ps-Pulsen. Die erhöhte Absorption konnte allerdings nicht die geringere zur Verfügung stehende Ausgangsleistung bei 355 nm ausgleichen, so dass in diesen Untersuchungen geringere Schneidgeschwindigkeiten erreicht wurden.

Neben den Untersuchungen zu erreichbaren Schneidgeschwindigkeiten waren Betrachtungen zu erzielbaren Schnittkantenqualitäten ein weiterer Schwerpunkt der Arbeiten. Zunächst wurde das Erscheinungsbild der Schnittkante im Längsschliff analysiert. Erwünscht ist ein klar strukturiertes Erscheinungsbild der einzelnen Schichten des Anoden- bzw. Kathodenmaterials. Eine Verunreinigung der oberen bzw. unteren nichtmetallischen Schicht durch Ablagerungen der metallischen Schicht ist zu vermeiden.

Die Analyse zeigt, dass bei Wahl geeigneter Parameter ein klar strukturiertes Erscheinungsbild der Schnittkante umsetzbar ist. Die lediglich geringfügige Spritzerbildung mit Ablagerungsgrößen im Bereich < 3 µm ist als unkritisch einzustufen. Das charakteristische Erscheinungsbild der Schnittkante einer Anode bzw. Kathode bei geeigneten Parametern zeigt **Bild 21** in entsprechenden REM-Aufnahmen.

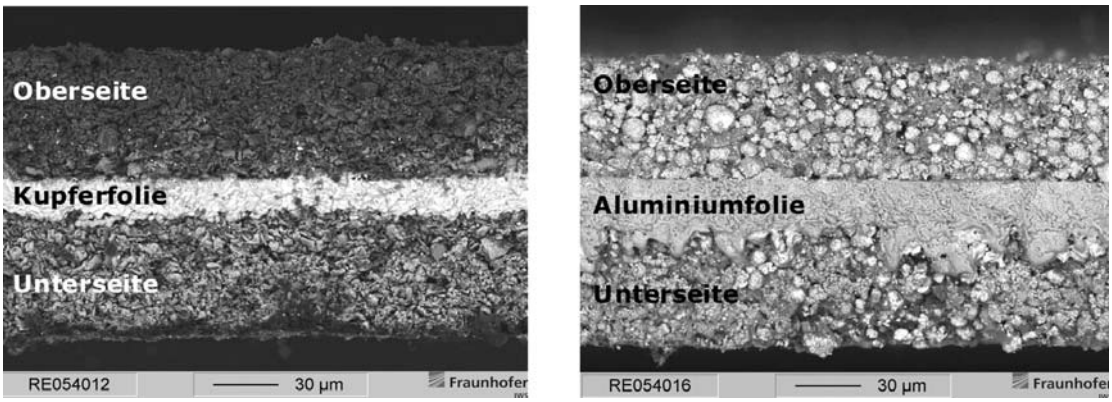


Bild 21: **REM-Aufnahmen einer Schnittkante im Längsschliff, Anode (li.) und Kathode (re.), 355 nm, P_L = 5 W**

Nach Absprache mit den Projektpartnern wurden im weiteren Verlauf des Projektes zusätzliche Kriterien zur Beurteilung der Schnittkante herangezogen. Dies ist einerseits die Breite der Ausfransung w_f und anderseits die Breite der Entschichtung w_c. Beide Kenngrößen lassen sich in der Draufsicht der Probe bestimmen. Dabei definiert sich die Entschichtung w_c als Breite der sichtbaren metallischen Schicht, welche durch Ablation der oberen nichtmetallischen Beschichtung des Elektrodenmaterials entsteht. Die Ausfransung w_f hingegen ist die Breite der unteren nichtmetallischen Beschichtung, die gegenüber der metallischen Schicht hervorsteht. **Bild 22** stellt die Bestimmung der genannten Kenngrößen in der Probendraufsicht nochmals visuell dar.

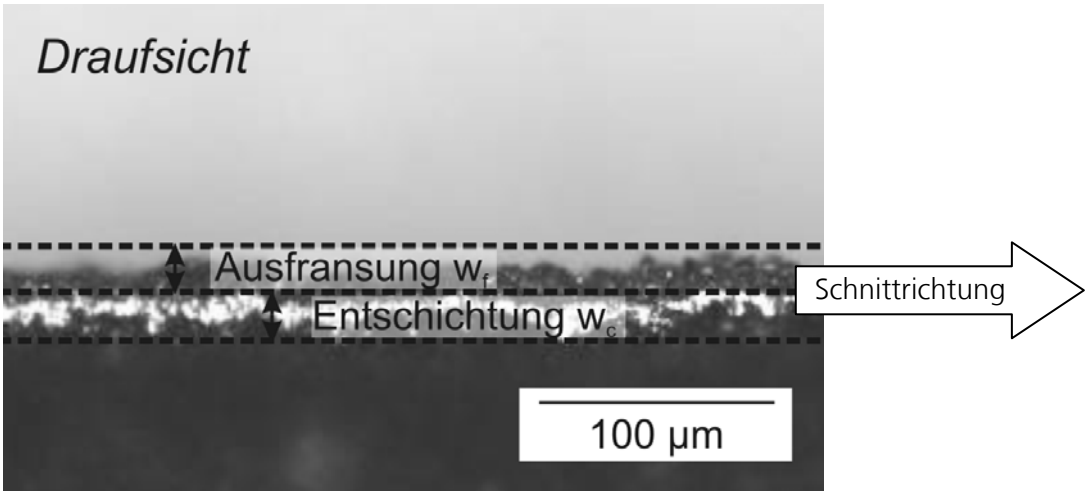


Bild 22: **Bestimmung der qualitativen Kenngrößen Ausfransung w_f und Entschichtung w_c**

Unter Nutzung der bereits genannten Parameter lassen sich mit dem ps-System Entschichtungsbreiten im Bereich w_c = 20 µm realisieren, wobei die Schnittkante des Kathodenmaterials rauer erscheint als jene des Anodenmaterials. Bei vollständiger Trennung der Probe ist keine über die Kantenrauheit hinausgehende Ausfransung festzustellen.

Trennen mit Strahlquellen im cw-Betrieb

Die folgenden Untersuchungen konzentrierten sich ausschließlich auf die Nutzung von Strahlquellen im Dauerstrich- bzw. cw-Betrieb. Entsprechend der definierten Anforderungen wurde ein Hochleistungs-Faserlaser mit Grundmodestrahlung bei einer emittierten Wellenlänge von 1070 - 1080 nm genutzt. Die maximal verfügbare Ausgangsleistung beträgt 5000 W bei einer Strahlqualität von $M^2 < 1{,}25$. Analog zu den vorherigen Untersuchungen mit gepulster Strahlquelle wurde auch hier ein hochdynamisches Scan-System zur Strahlablenkung genutzt. Auf die unterstützende Wirkung einer Schneidgasströmung wurde hier ebenfalls bewusst verzichtet. Den genutzten Versuchsaufbau gibt **Bild 23** wieder.

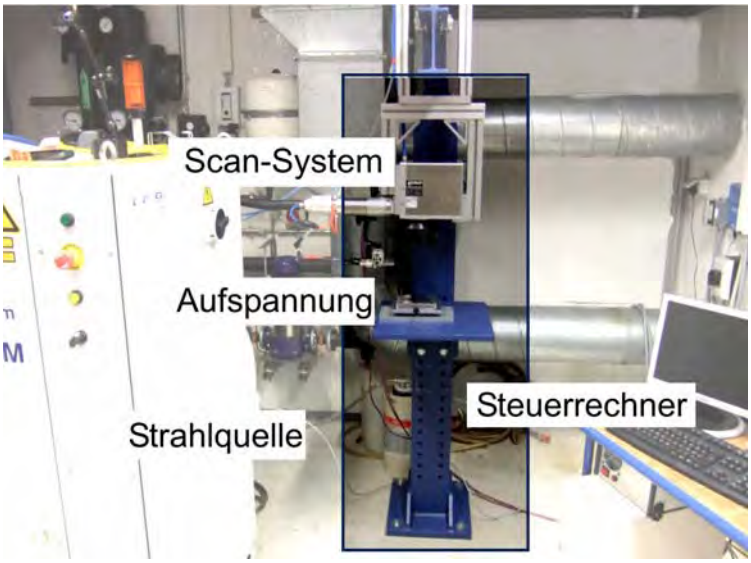


Bild 23: **Versuchsaufbau zum Remote-Schneiden der Materialien mit kontinuierlich strahlender Laserquelle**

Entsprechend der optischen Abbildungsverhältnisse ergab sich ein Durchmesser der Strahltaille von $d_f = 25$ µm. Die mit diesem Versuchsaufbau erreichten Schneidgeschwindigkeiten für das Anoden- als auch Kathodenmaterial stellt **Bild 24** graphisch dar.

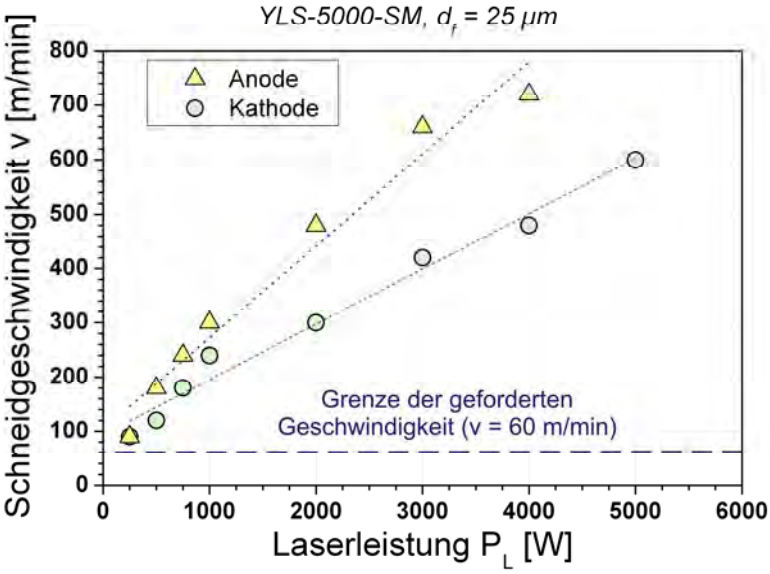


Bild 24: **Schneidgeschwindigkeiten in Abhängigkeit der Laserleistung für Anode und Kathode**

Erwartungsgemäß verhält sich auch hier die Schneidgeschwindigkeit direkt proportional zur Laserleistung und steigt mit dieser an. Analog zu den bisherigen Ergebnissen liegen bei gegebener Laserleistung die Schneidgeschwindigkeiten beim Anodenmaterial über jenen des Materials der Kathode.

Im leistungsmaximum kann das Kathodenmaterial mit v = 600 m/min geschnitten werden. Beim Material der Anode werden bereits bei P_L = 4000 W mit v = 720 m/min die dynamischen Grenzen des genutzten Scan-Systems erreicht. Erzielbare Schneidgeschwindigkeiten bei P_L > 4000 W liegen somit oberhalb von 720 m/min, sind jedoch mit dem genutzten Scan-System systemtechnisch nicht mehr umsetzbar. In Bezug zur Grenze des geforderten Geschwindigkeitsbereiches sind bereits Laserleistungen von 250 W ausreichend, um die gestellten Anforderungen zu erfüllen.

Beim Trennen des Separators sind noch geringere Leistungen notwendig, um im Zielbereich der geforderten Schneidgeschwindigkeiten zu liegen, wie **Bild 25** veranschaulicht.

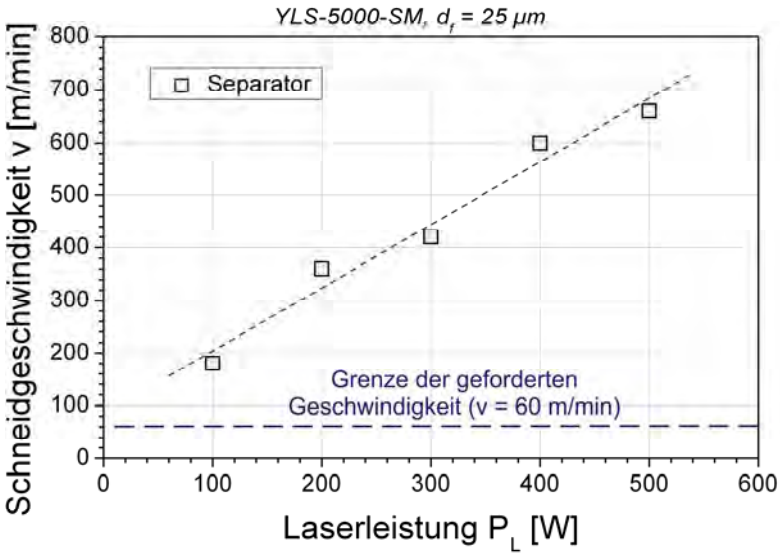


Bild 25: **Schneidgeschwindigkeiten in Abhängigkeit von der Laserleistung für das Separatormaterial**

Charakterisierung der Schnittkanten

In Bezug auf die qualitative Bewertung der Schneidergebnisse weisen die Schnittkanten der mit cw-Strahlung geschnittenen Elektroden im Längsschliff ebenfalls ein klar strukturiertes Erscheinungsbild auf (**Bild 26**).

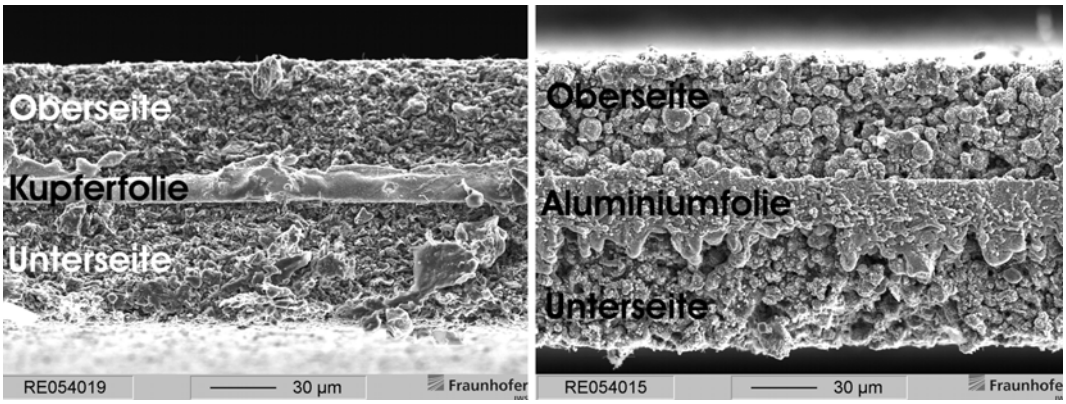


Bild 26: **REM-Aufnahmen einer Schnittkante im Längsschliff, Anode (li.) und Kathode (re.),**

Die Spritzerbildung ist mit Ablagerungsgrößen im Bereich < 3 µm wiederum als unkritisch einzustufen. Die Analyse der Breite der Ausfransung bzw. Entschichtung weist ähnliche Ergebnisse wie beim Schneiden mit gepulster Laserstrahlung auf, wenngleich die erreichten Werte des Kathodenmaterials gegenüber dem Material der Anode leicht erhöht sind. Es sind Entschichtungsbreiten w_c < 30 µm bzw. Breiten der Ausfransung $w_f \approx 10$ µm bei Wahl geeigneter Parameter realisierbar. Weiterführende Untersuchungen zeigen eine starke Abhängigkeit der qualitativen Kenngrößen von der relativen Lage des Fokus z_f, siehe **Bild 27**.

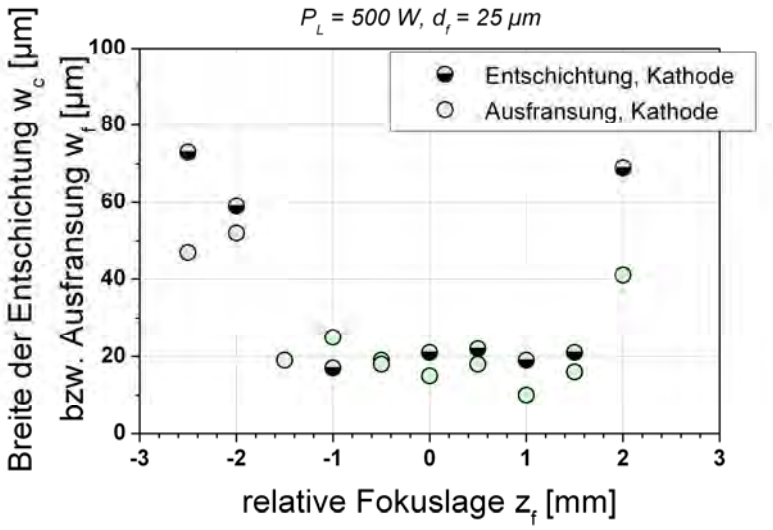


Bild 27: **Abhängigkeit der Breite der Entschichtung bzw. Ausfransung von der relativen Fokuslage für das Kathodenmaterial**

Bild 27 zeigt auch, dass in einem relativ großen Bereich von -1,5 mm < z_f < 1,5 mm vergleichsweise konstante Werte der Entschichtungs- bzw. Ausfransungsbreite umsetzbar sind. Es ergibt sich somit ein Prozessfenster bezüglich der Fokuslage von ca. 3 mm. Wird mit einer Fokuslage außerhalb des beschriebenen Prozessfensters gearbeitet, ist ein starker Anstieg der Kennwerte feststellbar. Im Minimum ist bei einer Laserleistung von 500 W eine Breite der Entschichtung von w_c = 20 µm bzw. eine Breite der Ausfransung von w_f = 10 µm umsetzbar.

Die qualitativen Untersuchungen wurden ergänzt durch Untersuchungen mit konfokaler Laser-Scanning-Mikroskopie (LSM), welche ein detailliertes, dreidimensionales Bild der Probe generiert. Anhand der erzeugten Höhenprofile kann ein eventueller Aufwurf bzw. eine mögliche Gratausbildung auf der Probe detektiert und bestimmt werden. Die Genauigkeit der Messergebnisse wird allerdings durch die Oberflächenrauheit der Schichtoberflächen begrenzt.

Die Untersuchungen der Proben weisen beim Kathodenmaterial, unabhängig vom verwendeten Laser und dessen Betriebsart (gepulst, kontinuierlich), keine signifikante Überhöhung an den Schnittkanten auf. Das dreidimensionale Abbild einer Probe (Kathode) sowie das zugehörige Höhenprofil zeigt **Bild 28**.

Bei der Anodenfolie konnte bei den mit ns-Pulsen geschnittenen Proben eine ca. 100 µm breite und bis zu 10 µm hohe Aufwölbung entlang der Schnittkante festgestellt werden, siehe **Bild 29**. Die Ursache liegt vermutlich in einem Quellen des Schichtmaterials infolge thermischer Beeinflussung.

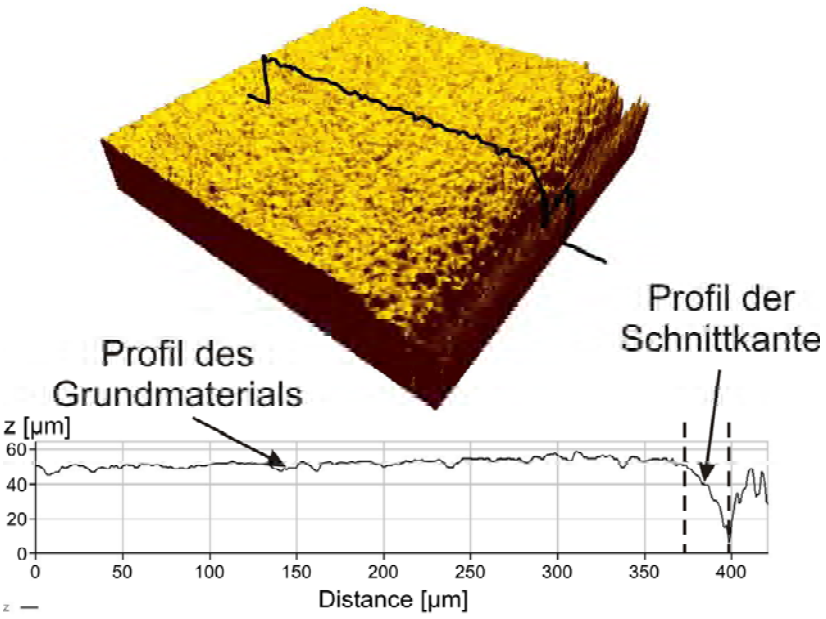


Bild 28: **Dreidimensionales Abbild einer Probe mit zugehörigem Höhenprofil (Kathode)**

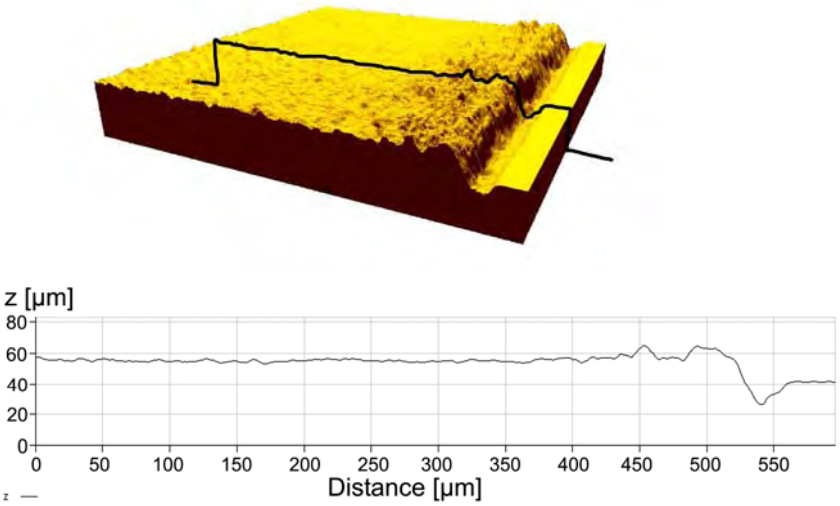


Bild 29: **Dreidimensionales Abbild einer Probe mit zugehörigem Höhenprofil (Anode, ns-Laser)**

Im Gegensatz dazu konnten derartige Effekte bei den mit ps-Pulsen und dem cw-Faserlaser getrennten Anoden nicht festgestellt werden. Mögliche Erklärung für diese Unterschiede sind die deutlich höheren Schnittgeschwindigkeiten beim cw-Faserlaser (kürzere Wechselwirkungszeit) sowie die extrem kurzen Pulsdauern beim ps-System.

Weiterentwicklung der Software-Lösung RedCut

Das am Fraunhofer IWS entwickelte Softwarepaket REDcut erlaubt die Simulation und Umsetzung von Achsüberlagerungen für verschiedene Achskonfigurationen. Die Simulationsumgebung wurde um die spezifischen Anforderungen erweitert, die sich aus dem Zuschnitt der Folienmaterialien ergeben. Damit lassen sich Berechnungen des Maschinenverhaltens bei unterschiedlichen Konturen und Dynamiken durchführen. Auf Basis technologischer Parameter können somit die dynamischen und geometrischen Kennwerte von Achssystemen auch in Achsüberlagerung bestimmt und zur Anlagenauslegung genutzt werden. Für die Laserbearbeitung mit kartesischen Achsen ist dies möglich und umsetzbar.

Die Simulation von Scannerachsen, wie diese für die Remote-Bearbeitung genutzt werden, konnte nur bedingt implementiert werden, da sich das Ansteuerkonzept maßgeblich von dem von NC-Achsen unterscheidet. Maßgebend für NC-Achsen ist die Konturtreue innerhalb der festgelegten Steuerungsparameter. Scannerachsen arbeiten mit konstanten Schleppverzügen (Zeit), die in Abhängigkeit der Geschwindigkeit als absolute laterale Abweichung unterschiedlich große Werte annimmt. Die Beschreibung durch die Dynamikwerte Ruck und Beschleunigung ist nicht im gleichen Maße gelungen, wie das für kartesische Achsen möglich ist.

Für Geschwindigkeiten bis 1 m/s auf geraden Konturen konnten Ergebnisse, wie in **Bild 30** dargestellt, erreicht werden. Für höhere Geschwindigkeiten konnte dieses Maß der Annäherung bisher noch nicht erreicht werden. Diese Ergebnisse hatten direkten Einfluss auf die vorgesehene direkte Steuerungsanbindung von Scannern.

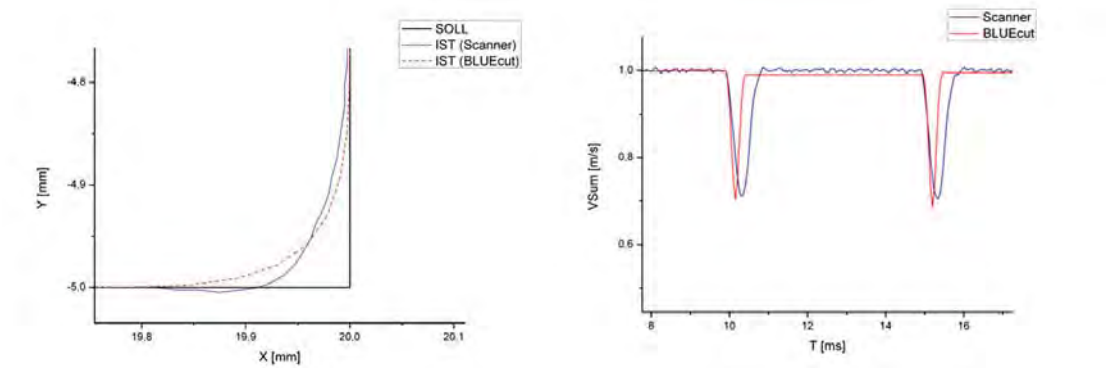


Bild 30: **Annäherung der Simulationsergebnisse an die Geometrie (links) und Geschwindigkeit (rechts) einer Scannerbewegung** (Hinweis: BLUEcut = Simulationsumgebung des Softwarepaketes REDcut für nichtüberlagerte Bewegungen)

Das derzeit nicht ausreichend beschreibbare Verhalten der Scanner erfordert andere Ansteuerungslösungen. Die explizite Vorgabe von Positions- und Bewegungsbefehlen, wie es vom Ansprechen von NC-Achsen bekannt ist, wurde als Lösungsansatz ausgewählt. Die notwendige Hardware wurde entworfen und erstellt. Das grundlegende Ansteuerungskonzept, welches die Anbindung einzelner Scannerachsen an die im Fraunhofer IWS genutzte Beckhoff-Steuerungsarchitektur erlaubt, wurde erarbeitet.



Bild 31: **Hardware zur direkten Ansteuerung von Scannerachsen**

Weiterhin wurde REDcut online um den Auswahlpunkt Technologie ergänzt. Dieser erlaubt den Zugriff auf Bearbeitungsparameter entsprechend gewähltem Material und gewählter Dicke. Die hinterlegte Datenbank ist jederzeit beliebig erweiterbar.

Fazit
Die umfassenden Grundlagenuntersuchungen zum Trennen der Elektrodenmaterialien bzw. des Separators mit gepulsten und cw-betriebenen Lasern zeigen das erhebliche Potenzial des Remote-Schneidens zum Konfektionieren solcher Materialien auf. Bereits mit Ausgangsleistungen von wenigen hundert Watt lässt sich die geforderten Schneidgeschwindigkeit von v = 60 m/min beim Beschnitt der Elektroden erreichen.

Die Schnittkanten erscheinen im Längsschliff klar strukturiert und frei von kritischen Ablagerungen. Typische Werte der Entschichtungsbreite liegen bei 10 - 20 µm, Werte der Ausfransung bei ca. 0 - 10 µm. Die erreichten Kennwerte in Abhängigkeit der genutzten Laserbetriebsarten am Beispiel des Anodenmaterials fasst **Tabelle 7** zusammen.

Tabelle 7 **Erreichte Kennwerte in Abhängigkeit von der Laserbetriebsart am Beispiel des Anodenmaterials, d_f = 25 - 30 µm**

Laserbetriebsart	Laserleistung [W]	Schneidgeschwindigkeit [m/min]	Breite der Entschichtung [µm]	Breite der Ausfransung [µm]
cw	500	180	< 30	~ 10
ns-Pulse	43	25	< 30	< 10
ps-Pulse	40	20	< 20	~ 0

Grundsätzlich bieten die gepulsten Systeme (insbesondere ultrakurz-gepulste Laser) mit ihrer Vielzahl an Variationsmöglichkeiten der Parameter ein größeres Potenzial zur weiteren Verbesserungen der Schnittqualität, falls dies erforderlich ist. Alles in allem müssen in abschließenden Dauertests von Li-Ionen-Zellen mit lasergeschnittenen Elektroden bzw. Separatoren die kritischen Werte der qualitativen Kenngrößen weiter definiert werden.

Die gewonnenen Erkenntnisse dienten als Wissensbasis für den Aufbau der automatisierten Anlage zum Laserstrahl-Sublimationsschneiden am *iwb* der TU München.

5.2.2 Automatisierte Anlage zum Lasersublimationsschneiden

Aufbauend auf den im Projekt durchgeführten Untersuchungen des IWS, des *iwb* und der Firma Manz AG zum Laserstrahltrennen von Elektroden wurde für die automatisierte Lasertrennanlage eine Laserstrahlquelle ausgewählt, die sowohl unter wirtschaftlichen als auch technischen Gesichtspunkten für die Massenfertigung von Lithium-Ionen Zellen geeignet ist. Im vollautomatisierten Trennmodul ist ein gepulster Faserlaser der Firma IPG mit folgenden Kennwerten integriert:

- Wellenlänge: 1064 nm
- Strahlqualität: $M^2 = 2$
- Pulslänge: 30 ns
- Pulsenergie: 0,2 mJ
- Repetitionsrate: 500 kHz
- Mittlere optische Ausgangsleistung: 100 W

Bild 32 zeigt die im Projektverlauf entwickelte und am *iwb* aufgebaute vollautomatisierte Anlage zum Vereinzeln der Elektroden mittels Lasersublimationsschneiden.

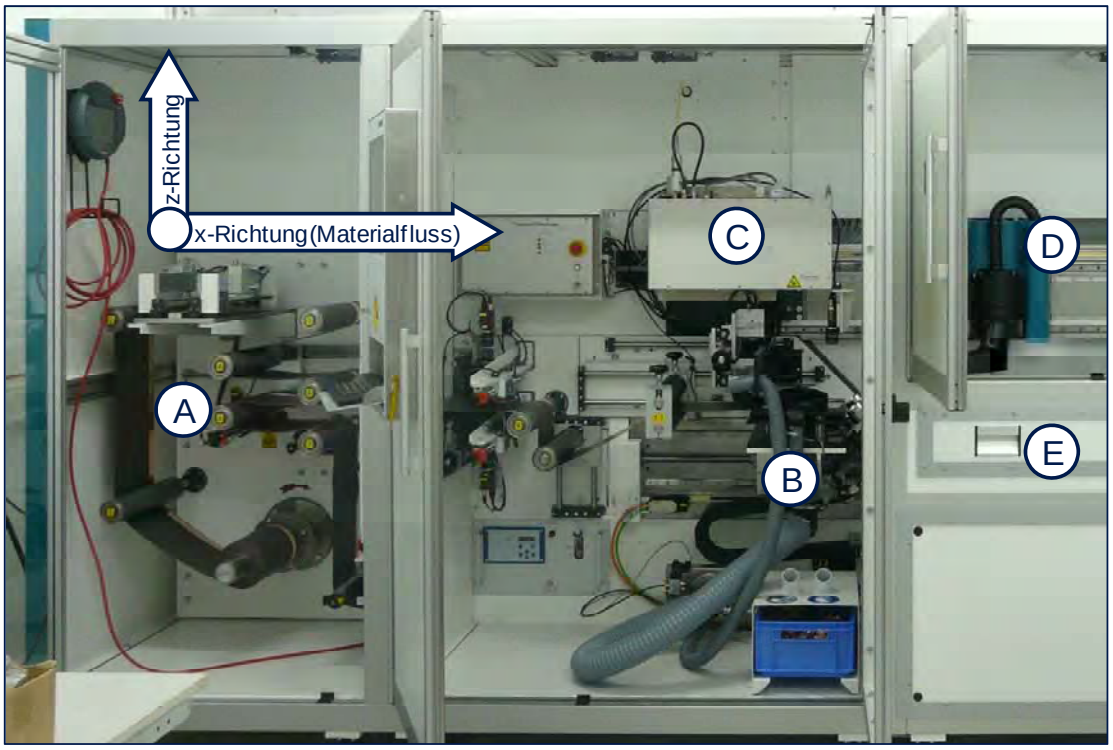


Bild 32: **Elektrodenschneider im Trockenraum am *iwb***

Zur Strahlablenkung und Fokussierung wird ein 3D-Scannersystem eingesetzt (**Bild 32 C**). Um entsprechend der Projektanforderungen zur Formatflexibilität ein Arbeitsfeld von 350 mm x 350 mm abzudecken, beträgt der Arbeitsabstand 360 mm. Mit einer Brennweite von 500 mm bei einer Apertur von 50 mm werden ein Fokusdurchmesser von 50 µm und eine Rayleigh-Länge von 0,9 mm erreicht. Bei einem 3D-Scanner kann mit Hilfe einer Kalibrierung der z-Achse trotz der sehr kurzen Rayleigh-Länge sichergestellt werden, dass die Elektrodenfolie auf der Aufspannung ideal im Fokus liegt.

Zur Bearbeitung werden die Elektrodenfolien mit Unterdruck auf einer Lochplatte fixiert (**B**). Entlang der Schnittfuge ist eine Aussparung vorgesehen. Ober- und unterhalb dieser Aussparung werden die beim Lasertrennen entstehenden Partikel abgesaugt und gefiltert. Dadurch wird eine Verunreinigung der Elektrodenflächen durch die entstehenden Partikel vermieden. Zudem breiten sich die toxischen Dämpfe, die bei der thermischen Zersetzung der Beschichtung freigesetzt werden, nicht im Trockenraum aus.

Außerdem wird durch die permanente Absaugung des Rauches aus dem Strahlengang verhindert, dass die einfallende Laserstrahlung inhomogen gestreut wird. Diese Vorkehrung trägt maßgeblich dazu bei, die Stabilität und Reproduzierbarkeit des Schneidprozesses zu gewährleisten. Nach dem Schnitt wird das separierte Elektrodenblatt durch ein Vier-Achs-System mit einem Unterdruckgreifer (**D**) aus der Aufspannung entnommen und in ein Magazin (**E**) abgelegt. Die Zuführung der Elektroden von der Rolle in die Aufspannung erfolgt über das Tänzersystem (**A**).

Prozessoptimierung

Nach der Entwicklung und dem Aufbau des Elektrodenschneiders wurden die Prozessparameter, die Ablaufsteuerung sowie einzelne mechanische Komponenten für die gegebene Anlagenkonfiguration optimiert. Motivation und Bewertungskriterium für die Systemverbesserung war die Qualität der Schnittkante. Bei Elektroden für Lithium-Ionen-Zellen handelt es sich um Multimaterialsysteme, welche auf Grund ihrer heterogenen physikalischen Eigenschaften (Siedepunkt, Absorptionsgrad, Wärmekapazität und -leitfähigkeit) unterschiedliche Laserabtragschwellen aufweisen.

Um die Beschichtung abzutragen, reicht bereits eine relativ geringe Intensität, wie sie am Rand der gaußförmigen Intensitätsverteilung vorliegt. Die Trägerfolien aus Metall, vor allem die Kupferfolien der Anoden, werden erst bei höheren Intensitäten sublimiert. Wird der Laserstrahlfokus auf dem Bauteil fortbewegt, wird zunächst die Beschichtung im Randbereich des Fokus abgetragen, so dass der Bereich des Fokus mit hoher Intensität immer auf die bereits von der Beschichtung befreite Folie auftrifft.

Vor dem Hintergrund der heterogenen Abtragsschwellen und Absorptionsgrade der Materialien ist besonders die Optimierung der Trennparameter wichtig für die industrielle Übertragbarkeit der entwickelten Anlagen- und Prozesstechnik. Besonders das Lasersublimationsschneiden der Anoden stellt eine Herausforderung dar, weil die zum Materialabtrag benötigte Intensität der Graphitbeschichtung und der Kupferfolie den höchsten Unterschied aller in der Zelle auftretenden Materialpaarungen aufweist.

In methodisch-geplanten Screening-Versuchen (dreistufiger Versuchsplan mit orthogonal variierendem Parameterfeld) konnte im Projektverlauf ein Prozessfenster identifiziert werden, dass hervorragende, den Anforderungen entsprechende Schnittergebnisse liefert. Relevante Schnittparameter sind die Laserleistung, die Scangeschwindigkeit, die Pulsfrequenz, die Fokuslage in z-Richtung, die Durchflussmenge der Absaugungseinrichtung, die Geometrie der absaugenden Düse und die kritischen Schneidbewegungsradien bei der Bearbeitung.

Mit 100 W Laserleistung konnte das beste Schnittergebnis bei einer Scangeschwindigkeit von 0,4 m/s, einer Pulsfrequenz von 500 kHz und einer Fokuslage von 0,5 mm über der Materialoberfläche erzielt werden. Damit konnte eine deutliche Verbesserung der Kantenqualität im Vergleich zu den Initialparametern (Laserleistung 100 W, Scangeschwindigkeit von 0,5 m/s, Pulsfrequenz 500 kHz, Fokuslage 0 mm) erreicht werden.

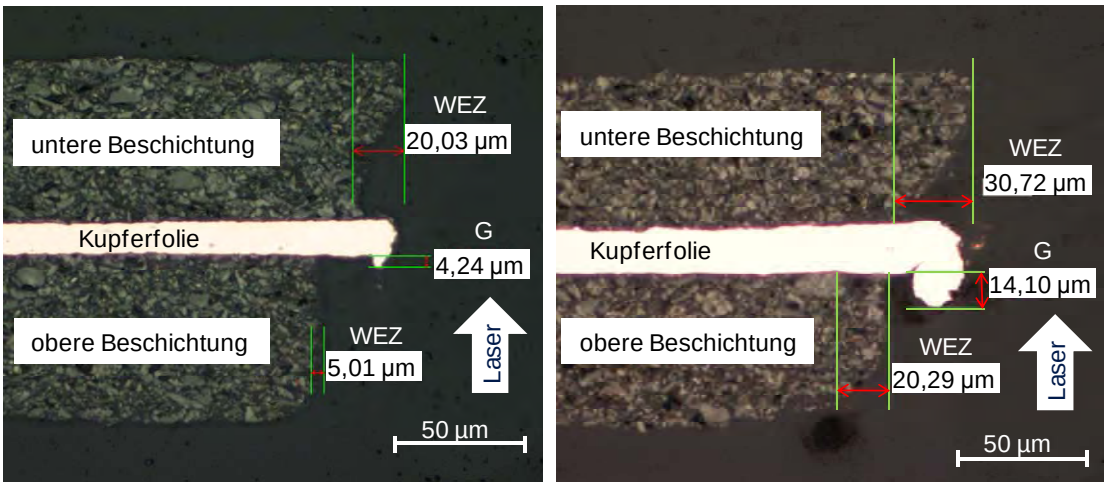


Bild 33: **Mikroskopaufnahme der Schnittkante im Schliffbild**
links: optimierte Prozessparameter; rechts: Initialparameter

Bild 33 zeigt die Schnittkante bei optimierten Parametern (links) im Vergleich zur Schnittkante mit Initialparametern (rechts). Es ist eine deutliche Reduktion der Grathöhe (G), der Schnittbreite und der Wärmeeinflusszone (WEZ) zu erkennen.

Schnittversuche mit Kathodenmaterialien zeigen eine ähnliche Topographie der Schnittkante. In **Bild 34** ist das mit einem optischen Rastermikroskop der Firma Keyence aufgezeichnete Höhenprofil der Kathodenkante zu sehen. Im markierten Bereich ist ein Tableau zu erkennen, dass auf eine Freilegung der Aluminiumträgerfolie in einer Breite

von ca. 20 µm schließen lässt. Der im Vergleich zur Anode geringere entschichtete Bereich lässt sich durch die geringere Differenz der Abtragsschwellen zwischen Aluminiumfolie und dem Aktivmaterial erklären. Die näher aneinander liegenden Sublimationsintensitäten führen zu einer kleineren Schnittradiendifferenz.

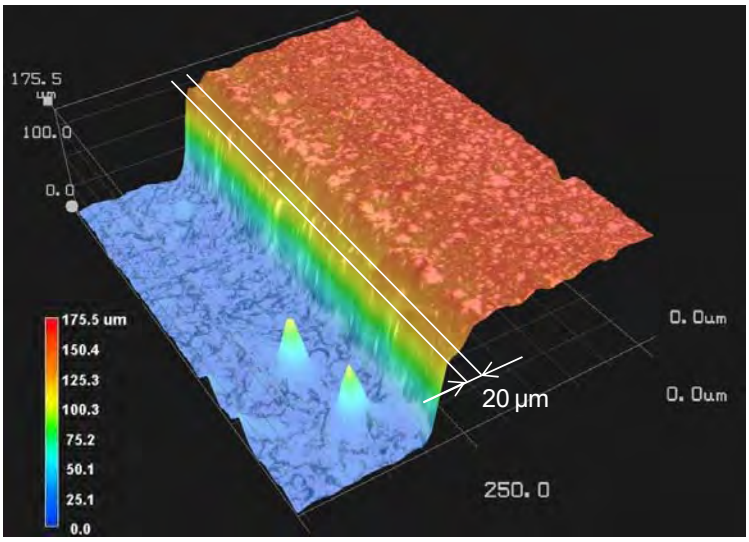


Bild 34: **Topographie der Kathodenschnittkante**

Bei optimierten Parametern erreicht die Anlage eine Taktzeit von ca. 3 Sekunden pro Elektrode. Die Schnittzeit innerhalb eines Taktes liegt bei 1,6 Sekunden. Die im Projekt DeLIZ entwickelte und umgesetzte Anlage zum Lasersublimationsschneiden von Elektroden erfüllt die zu Projektbeginn zusammen mit dem Partner Li-Tec Battery GmbH erarbeiteten Anforderungen. Die Projektziele hinsichtlich Prozessqualität und Wirtschaftlichkeit konnten vollständig erreicht werden. Eine industrielle Verwertung der Ergebnisse wird von der Manz Tübingen GmbH bereits verfolgt.

Fazit

Aufbauend auf den Untersuchungen des IWS wurde eine vollautomatisierte Anlage zum Lasertrennen von Elektroden entwickelt und im Trockenraum des *iwb* aufgebaut. Eingesetzt wird ein gepulster Nanosekundenlaser mit einer Wellenlänge von 1064 nm. In Versuchen zur Optimierung des Systems zeigte sich ein starker Einfluss der Fokuslage des Lasers und des Durchflusses der Prozessgasabsaugung auf die Qualität der Schnittkanten. Neben diesen Parametern wurden auch die Schnittgeschwindigkeit, die Laserleistung und die Pulsfrequenz als qualitätsrelevante Parameter identifiziert. Durch die Optimierung konnte ein Prozessfenster gefunden werden, dass gleichmäßige, homogene Schnittkanten mit sehr geringer Gratbildung durch Materialaufwurf ermöglicht.

5.3 Handhaben, Stapeln und Fixieren der Einzelfolien

5.3.1 Technologien und Systeme für geometrisch bestimmte Zellen

Klimatechnik

Auf Grund des schädlichen Einflusses von Wassermoleküleinschlüssen in den Batteriezellen wurde im Rahmen des Projektes ein Trockenraum am *iwb* aufgebaut, welcher eine Produktion der Zellen in einer Umgebung mit einer Luftfeuchtigkeit kleiner 0,07 g/kg (Taupunkt -42 °C) ermöglicht. Durch die Aufstellung und den Betrieb der Fertigungsanlagen im Trockenraum können die forschungstechnischen Analysen und Experimente zur Fertigung von Lithium-Ionen-Zellen unter realistischen Produktionsbedingungen durchgeführt werden. Der aufgebaute Trockenraum besitzt folgende Eigenschaften:

- Taupunkt der Restfeuchte: Lufteinlass -60 °C, mindestens -42 °C am Auslass
- Luftentfeuchtung: 600 g/h (Feuchteeintrag pro Person ca. 150 g/h)
- Lichte Raumabmaße (L x B x H): 8 m x 6 m x 3 m
- Druckluftentfeuchtung: 30 m³/h mit -70 °C Taupunkt
- Schnittstellen für Anlagentechnik und Versuchsequipment
- Sonderabluftanlage
- Stahlrahmen für die Positionierung der Klimatechnik über dem Trockenraum

Bild 35 zeigt den Trockenraum im Versuchsfeld des *iwb* sowie die Positionierung der beiden Produktionsanlagen innerhalb des Trockenraums. Die zusätzlichen freien Flächen innerhalb des Trockenraums sind für die Materiallagerung zur Entfeuchtung und die Durchführung von Grundlagenversuchen zum Materialverhalten. Für eine mögliche Schließung der Prozesskette im Anschluss an das laufende Projekt kann der Trockenraum mit der vorhandenen Klimatechnik erweitert werden.

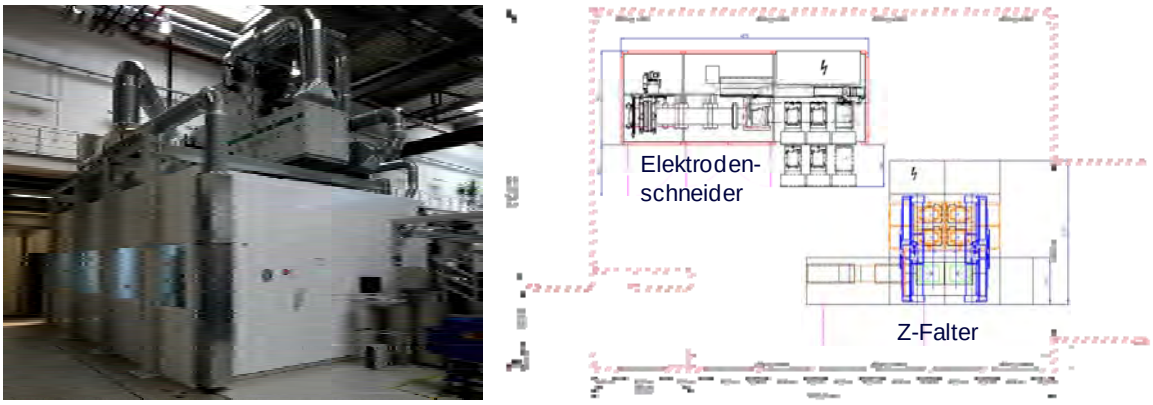


Bild 35: **Trockenraum am *iwb*; links: Seitenansicht; rechts: Grundriss mit Anlagen**

Prozessanalyse und -auswahl

Die Bildung des Zellstapels, die wechselnde Anordnung von Anode, Separator und Kathode zu einer elektrochemisch wirksamen Einheit, ist einer der entscheidenden wertschöpfenden Prozesse während der Zellherstellung. Zu Beginn des Vorhabenszeitraumes stand die Identifikation eines wirtschaftlichen und zukunftsweisenden Zellbildungsverfahrens. Aus dem Stand der Technik sind drei grundsätzliche Prinzipien zum Aufbau eines Zellstapels bekannt. **Bild 36** zeigt das Flachwickeln der Zellen in prismatischer Form, das Falten der Zelle in Z-Anordnung und das Stapeln von einzelnen Elektroden- und Separatorblättern.

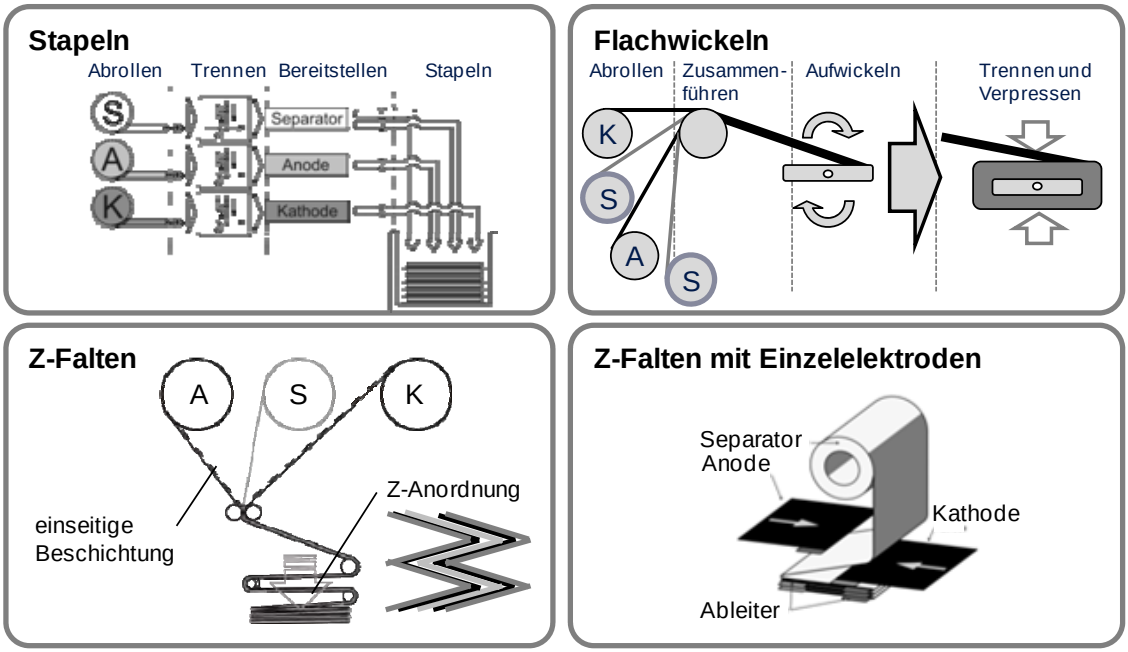


Bild 36: **Übersicht der Zellbildungsverfahren**

Mittels einer Nutzwertanalyse, in der die Kriterien Produktqualität, Prozesssicherheit, Wirtschaftlichkeit, Flexibilität und Einfluss auf die Produktmerkmale der Technologien betrachtet wurden, erfolgte die Bewertung der einzelnen Verfahren:

- Die zu erwartende Produktqualität für großformatige Zellen ist bei Verfahren, die einzelne Elektroden- und Separatorblätter verarbeiten, höher als bei der Verarbeitung kontinuierlicher Materialien, da die Fehlertoleranz höher ist und die Materialbelastung durch das Knicken der Folien entfällt.
- Zur Prozesssicherheit tragen eine geringe Störanfälligkeit, die Möglichkeit zur Materialpufferung und eine hohe Beherrschbarkeit der einzelnen Teilprozesse bei. Diese Anforderungen werden durch Prozesse mit Einzelelektroden besser erfüllt.
- Bei Prozessen, die Separatoren als Einzelblätter handhaben, wirkt sich deren parasitäre elektrostatische Aufladung im Trockenraum negativ auf die Handhabungs- und Prozesssicherheit aus.
- Zur Wirtschaftlichkeit eines Zellbildungsverfahrens trägt vor allem die Produktionsgeschwindigkeit bei. Diese ist bei kontinuierlichen Verfahren höher, da die aufwändige Handhabung von formlabilen Einzelfolien nicht erforderlich ist und nur wenige Sekundärtätigkeiten auftreten.
- Flexibilität gegenüber der Zellgeometrie ist vor allem beim Einzelblattstapeln gegeben, da damit auch nicht rechteckige Folienzuschnitte verarbeitet werden können. Die anderen Verfahren sind dabei stark beschränkt.
- Als wichtiges Produktmerkmal sei die Energiedichte der entstehenden Zellen genannt. Diese ist beim Flachwickeln aufgrund des notwendigen Wickelkerns niedriger als bei den anderen Verfahren.

Das Einzelblattstapeln bietet somit Vorteile bezüglich der Flexibilität und der Produktqualität. Das Z-Falten mit Einzelelektroden erzielt in diesen Kategorien, aufgrund der technologischen Nähe zum Einzelblattstapeln, annähernd hohe Wertungen. Aufgrund der kontinuierlichen Separatorverarbeitung ist dieser Prozess wirtschaftlicher und prozesssicherer. Aufgrund der Defizite gewickelter Zellen bezüglich Qualität und Energiedichte, wurde im Rahmen des Projekts DeLIZ letztendlich das Z-Falten mit Einzelelektroden umgesetzt.

Umsetzung des Z-Faltprozesses

Das ausgewählte Z-Falt-Verfahren wurde in einer automatisierten Anlage zusammen mit der Manz Tübingen GmbH technisch umgesetzt. Die Anlage **(Bild 37)** besteht aus einer Separatorzuführung (**A**), einem zentralen Bereich zur Faltung (**B**), der Zuführung für die einzelnen Elektrodenblätter aus Magazinen (**C**), der Station zum Fixieren der Zellstapel mittels Klebeband (**D**) und dem Schaltschrank mit der Anlagensteuerung (**E**).

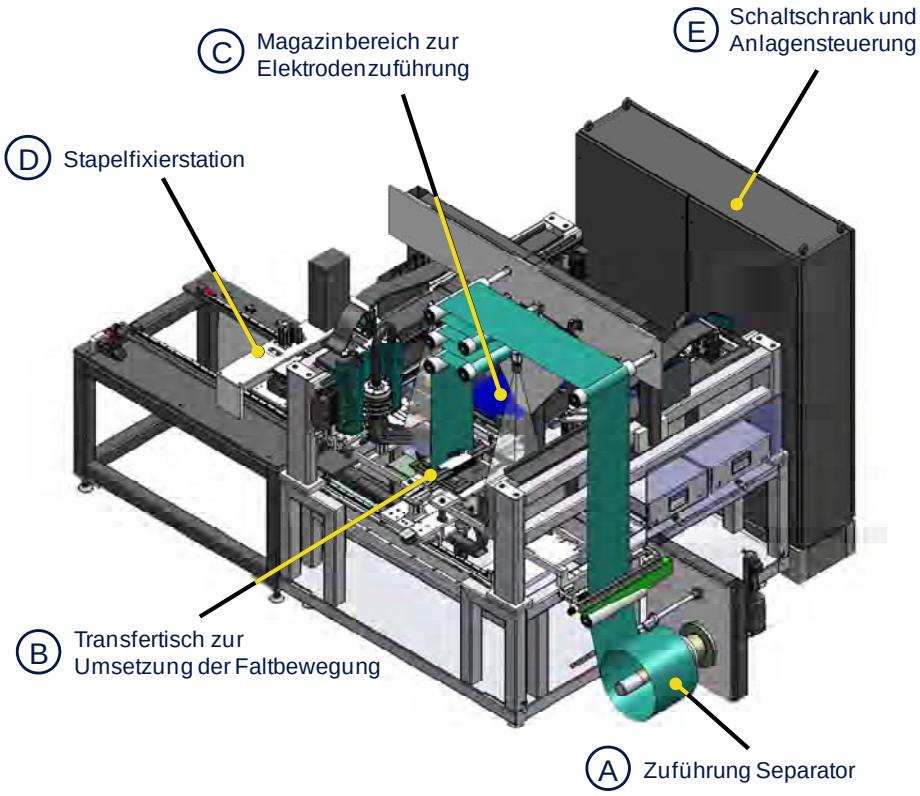


Bild 37: **CAD-Modell der Anlage zum Z-Falten**

Der Ablauf des Z-Faltprozesses ist in **Bild 38** dargestellt. Die Faltung des Separators wird durch die alternierende, horizontale Bewegung des Stapeltisches erzeugt. Der Separator wird zu Beginn des Faltens auf dem Tisch angesaugt und durch vier Niederhalter geklemmt (**1**). Anschließend fährt der Tisch in seine Grundstellung direkt unter den Führungswalzen des Separators (**2**). Aus dem linken Magazinbereich wird durch eine der beiden Handhabungseinheiten eine Anode geholt und die Position und Orientierung am Sauggreifer vermessen (**3**). Danach fährt der Stapeltisch unter die Anode, die daraufhin auf dem Separator abgelegt wird.

Während der Stapel durch den Greifer des Handhabungssystems gehalten wird, werden die Niederhalter seitlich aus dem Stapel gezogen und zur erneuten Stapelfixierung auf der Elektrode platziert. Die Ablageposition und -orientierung der Anode auf dem Stapel wird dabei überprüft und als Qualitätsmerkmal für den Stapel gespeichert (**4**). Der Stapeltisch fährt dann auf die rechte Seite, wo mittels der anderen Handhabungseinheit eine Kathode nach demselben Prinzip abgelegt wird (**5**). Anschließend wiederholen sich die Vorgänge zur Bildung der gewünschten Stapelgröße.

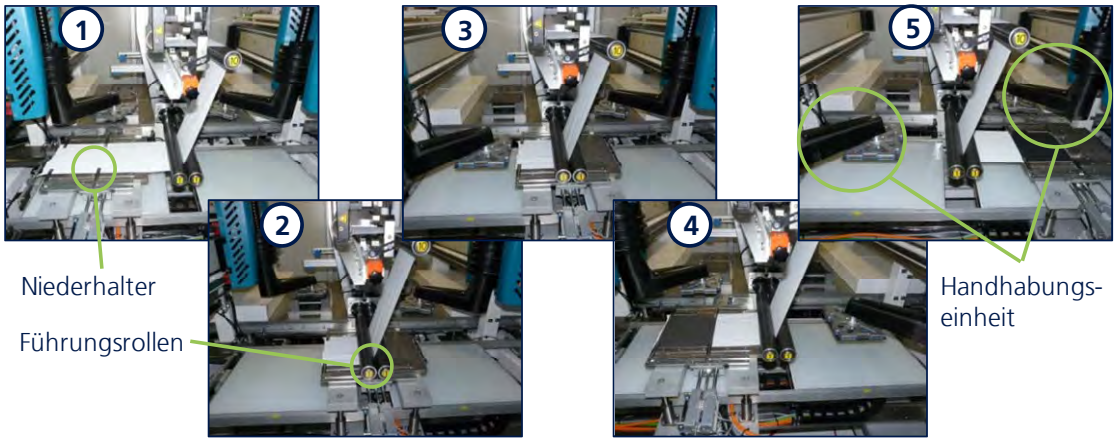


Bild 38: **Ablauf des Z-Faltprozesses**

Hat der Stapel die gewünschte Höhe erreicht, wird dieser von einem Zangengreifer aus dem Stapelbereich entnommen. Die kontinuierliche Separatorbahn wird dabei erneut auf dem Tisch fixiert und mit Hilfe eines Schneidmessers vom Zellstapel getrennt. Im Anschluss daran wird der fertige Stapel mit Klebeband automatisiert fixiert und ausgeschleust. Währenddessen kann bereits mit der Herstellung eines neuen Stapels begonnen werden.

Herausforderungen beim Z-Falten

Die wesentlichen Herausforderungen beim umgesetzten Z-Faltprozess bestehen in der kontinuierlichen Zuführung und dem Falten des Separators bei hohen Prozessgeschwindigkeiten. Beide Prozesse werden durch den in DeLIZ verwendeten Fließseparator Separion® der Li-Tec Battery GmbH aufgrund seiner porösen, keramischen Beschichtung mit ausgeprägter Reißneigung erschwert (Bild 39).

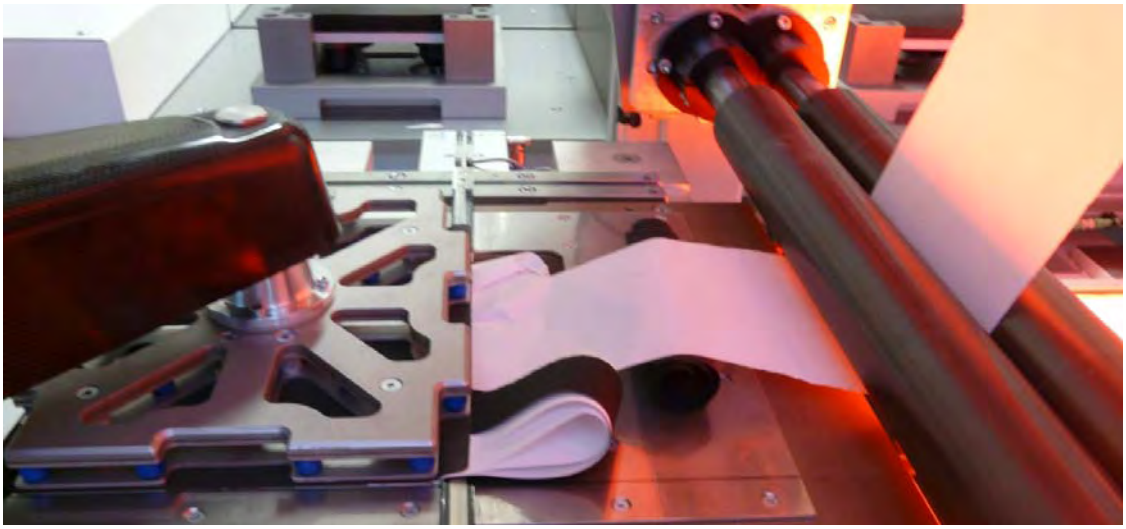


Bild 39: **Typischer Fehler: Reißen des Separators während des Stapelns**

Das Reißen des Separators, insbesondere beim Zugrichtungswechsel in der Mitte des Verfahrwegs, kann mit Spannungsspitzen im Separatormaterial begründet werden. Durch die Niederhalter kann es zu Beschädigungen des Separators kommen, da diese mit hoher Anpresskraft auf den Stapel gedrückt werden müssen und dann aus der Faltzone gezogen werden.

Außerdem kommt es durch das Knicken des Separators zum Abplatzen der keramischen Beschichtung entlang der Faltlinie. Die Beschädigung des Separators erfolgt somit in zwei verschiedenen Zonen, einmal in der direkten Kontaktzone zwischen Niederhalter und Separator und zum anderen in der Faltlinie.

Bild 40 zeigt die Beschädigungen im Separatormaterial. Die einzelnen Elektroden werden mit hoher Geschwindigkeit durch die eingesetzten Speed-Picker der Manz AG zugeführt und abgelegt. Dabei kommt es zu Positionierungs- und Orientierungsabweichungen (**Bild 41**).

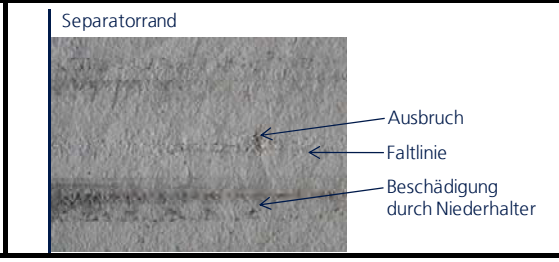
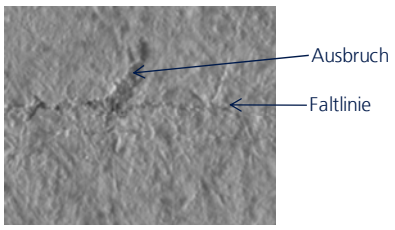
	Kontaktzone				**Freie Faltzone**	
	Faltlinie	**Ausbrüche**	**Niederhalter**		**Faltlinie**	**Ausbrüche**
	Breite	Breite	Länge	Breite	Breite	Breite
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
Min	0,004	0,030	0,500	0,030	0,003	0,030
Max	0,008	1,250	1,250	0,080	0,005	1,020
Median	0,005	0,075	0,830	0,060	0,004	0,090
						

Bild 40: **Beschädigung des Separators**

	Abweichung		
	Δ x	**Δ y**	**Δθ**
	[mm]	[mm]	[°]
Maximalwert	0,186	0,647	0,372
Minimalwert	-0,020	-0,068	-0,313
Median	0,111	0,005	-0,127

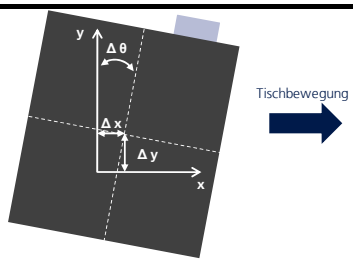


Bild 41: **Erreichte Positioniergenauigkeit beim Ablegen der Elektroden**

Maßnahmen zur Verbesserung des Z-Faltprozesses

Die bisher untersuchten Stellgrößen zur Beherrschung der im letzten Abschnitt genannten Herausforderungen beim Z-Falten sind die Geometrie der zur Fixierung des Stapels während der Zellbildung verwendeten Niederhalter sowie die Verfahrgeschwindigkeit des Lineartisches, welche die Taktzeit des Z-Faltprozesses erheblich beeinflusst.

Bei der Gestaltung der Niederhalter gilt es einen Kompromiss zwischen ausreichender Fixierung des Stapels und möglichst geringer Beschädigung des Separators zu finden. Dazu wurden verschiedene Niederhaltergeometrien getestet. Als besonders vorteilhaft haben sich dabei Niederhalter herausgestellt, welche neben abgeschrägten Unter- und Oberseiten mit großen Eckenradien zusätzlich nach unten gekrümmt sind. Dies führt bei der verwendeten Anpresskraft zur verbesserten Fixierung des Zellstapels auf dem Lineartisch.

Die Beschädigung des Separators durch die Niederhalter kann durch eine weiche, aber dennoch glatte Beschichtung der Niederhalter vermindert werden, beispielsweise durch eine Kunststoffummantelung (**Bild 42**). Die Beschädigung im Bereich der Kontaktzone wird dadurch so reduziert, dass außer der eigentlichen Faltlinie keine Beschädigung des Separators mehr festgestellt werden kann. Die Faltlinie ist in diesem Bereich zwischen 5 und 9 µm breit. Der Bereich innerhalb der freien Faltzone (ohne Niederhalterkontakt) ist von dieser Maßnahme nicht betroffen.



Bild 42: **Verwendeter Niederhalter**

Das Reißverhalten des Separators steht in engem Zusammenhang mit dem Spannungsverlauf in der Separatorbahn. Im Projekt DeLIZ wurde versucht, kritische Spannungsspitzen durch eine Reduzierung der Verfahrgeschwindigkeit des Lineartisches während des Faltvorgangs sowie durch eine Anpassung der Tänzerkraft zu vermeiden. Die vorgegebenen Geschwindigkeits- und Kraftprofile sind in **Bild 43** dargestellt. Die Erhöhung der Tänzerkraft in der Umgebung des Faltpunkts verhindert ein Durchhängen des Separators. Mit einer auf nahezu Null reduzierten Geschwindigkeit im Faltbereich und einer Verfahrgeschwindigkeit von 25 % der Maximalgeschwindigkeit über den restlichen Verfahrweg, ist eine Taktzeit von 6,0 s je Elektrode möglich.

Die durchgeführten Maßnahmen haben zu einer deutlichen Verbesserung des Z-Faltprozesses gegenüber dem Anfangszustand geführt. Entsprechend der im Industriebegleitkreis definierten Anforderungen ist zur Erreichung eines wirtschaftlichen Prozesses eine weitere Halbierung der Taktzeit erforderlich. Diese kann durch die Implementierung einer Bahnspannungsregelung für den Separator mit Hilfe des integrierten Tänzersystems oder durch angetriebene, geregelte Führungsrollen erreicht werden.

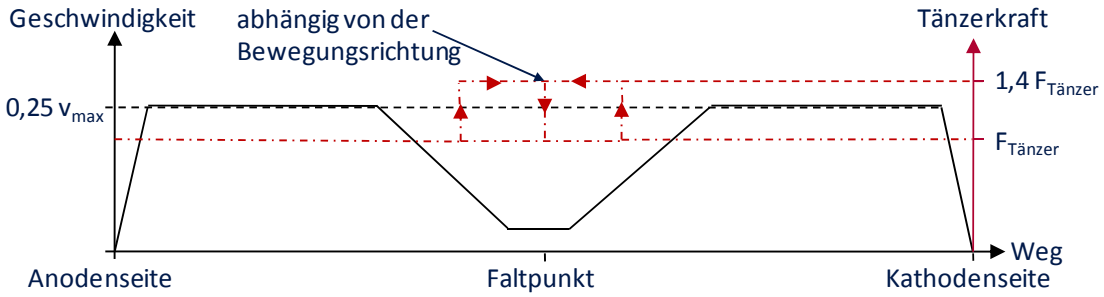


Bild 43: **Geschwindigkeitsprofil des Lineartisches**

Fazit

Die Bildung und Fixierung des Zellstapels ist einer der entscheidenden wertschöpfenden Prozesse während der Zellherstellung. Basierend auf einer Nutzwertanalyse und einem methodischen Prozessvergleich wurde das Z-Falten mit kontinuierlichem Separator und einzelnen Elektrodenfolien als das für die Umsetzung im Projekt zu evaluierende Zellbildungsverfahren identifiziert. Aufbauend auf den technologischen Untersuchungen zum Laserstrahlschneiden entstand eine separate, vollautomatisierte Anlage zum Lasertrennen und Ablagern von Elektrodenzuschnitten in Magazinen.

Da der Feuchtegrad der Umgebungsluft bei der Fertigung von Lithium-Ionen-Zellen einer der zentralen qualitätsrelevanten Faktoren ist, wurde die gesamte Anlagentechnik in einem Trockenraum aufgebaut. Dieser gewährleistet eine Prozessatmosphäre mit einem Taupunkt von mindestens -42 °C.

Zur technischen Umsetzung des Z-Falt-Prozesses sowie zur Fixierung der Rohzellen wurde ein automatisiertes Anlagenmodul entwickelt, aufgebaut und hinsichtlich Stapelqualität und Wirtschaftlichkeit optimiert. Größte Herausforderung dabei war die Geometrie und Beschaffenheit der Niederhalter. Durch eine Ummantelung der zur Umlenkung des Separators eingesetzten Niederhalter mit Kunststoff konnte das Einreißen des Separators an der Faltkante verhindert werden. Um eine optimale Geometrie hinsichtlich Stapelfixierung und Separatorfaltung zu identifizieren, wurden unterschiedliche Niederhaltergeometrien evaluiert.

Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die Optimierung der Separatorbahnspannung an den Prozess. Aufgrund der wechselnden Materialflussrichtung des Separators war dieser bei der Richtungsumkehr mit konstanter Bahnspannung oft gerissen. Dieser Effekt ist besonders bei keramischen Separatoren ausgeprägt. Hier war die maximale Geschwindigkeit beim Falten mit 3 s Taktzeit pro Elektrodenplatzierung stark limitiert. Durch eine dynamische Anpassung des Drucks im Tänzerspannungszylinder über ein Proportionalventil im Bereich zwischen 27 und 56 N konnte ein Durchhängen der Bahn bei höheren Geschwindigkeiten vermieden werden. So liegt die Effektivspannung der Bahn bei konstant 30 N und mechanische Spannungsspitzen, die zum Riss führen, können geglättet werden.

5.3.2 Technologien und Systeme für geometrisch unbestimmte Zellen

Bisherige Lithium-Ionen-Zellen (LIZ) zeichnen sich durch eine überwiegend rechteckige (z. B. Pouch-Zellen) oder runde Zellgeometrie aus. Diese standardisierten Geometrien führen jedoch aufgrund ihrer Formgebung zu einer unzureichenden Ausnutzung vorhandener Bauräume, insbesondere bei „conversion“ Elektrofahrzeugen. Zur Verbesserung der Bauraumausnutzung ist es zielführend, „geometrisch unbestimmte“ Zellformen bereitzustellen. Mit dieser Zielstellung erfolgte im Vorhaben zunächst eine Analyse technisch sinnvoller Zellgeometrien. Die Bewertung hinsichtlich Wirtschaftlichkeit und technologischer Relevanz führte im Weiteren zur exemplarischen Entwicklung von trapezförmigen Zellen sowie zugehöriger automatisierter Fertigungstechnologien.

Bei der Entwicklung geometrisch angepasster Zelldesigns stand die Anordnung der elektrischen Ableiter im Mittelpunkt der konzeptionellen Arbeit. **Bild 44** zeigt beispielhaft die Positionierungsmöglichkeiten der metallischen Ableiter einer Trapezzelle. Als besonders vorteilhaft erwies sich eine beidseitige Anordnung im seitlichen Zellbereich, wodurch sich eine maximale Ableiterfläche realisieren lässt. Dadurch reduziert sich die lokale Erwärmung im Betrieb, welche bei Überschreitung eines zulässigen Wertes zur Schädigung der Zelle führen kann. Zudem lassen sich bei dieser Anordnung die Zellen derart elektrisch koppeln, dass Kathode und Anode der benachbarten Zellen stets komplementär als Reihenschaltung verbunden werden können. Der Verschnitt des Kathoden- und Anodengrundmaterials ist bei dieser Anordnung zudem gering und beschränkt sich auf den unbeschichteten Ableiterfahnenbereich.

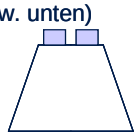
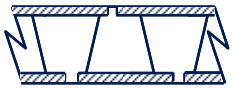
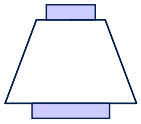
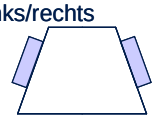
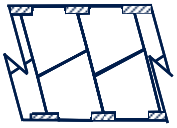
Ableiterpositionen	Vorteile	Nachteile	Belüftungs-möglichkeiten	Folienzuschnitt = Verschnitt
Einseitig (oben bzw. unten) 	einfaches Zusammen-schalten	lokal starke Erwärmungen im Ableiterbereich, da diese schmal und auf einer Seite angebracht sind	seitlich	
Beidseitig oben/unten 	gleichmäßige Temperatur-verteilung in der Zelle, breitere Ableiter möglich	abwechselnde Zelltypen erforderlich (Anode/Kathode abwechselnd oben liegend)	seitlich, oben/unten nur begrenzt	
Beidseitig links/rechts 	einfaches Zusammen-schalten, breite Ableiter, eine Konfig. reicht	seitliche Belüftung problematisch	oben/unten, seitlich nur begrenzt	

Bild 44: **Bewertungsübersicht zur Ableiterpositionierung**

Die Herstellung bisheriger LIZ erfolgte aufgrund der geometrischen Festlegung auf abwickelbare Standardgeometrien mittels kontinuierlicher Verfahren wie Z-Falten oder Wickeln. Die trapezförmigen Zellen bedürfen jedoch neuer Technologien zur Lageerfassung und Positionierung der Einzelfolien beim Herstellungsprozess eines Folienstapels, um eine exakte Positionierung der Folien zu gewährleisten. Die hierfür im Vorhaben entwickelte Prozessabfolge ist schematisch in **Bild 45** dargestellt.

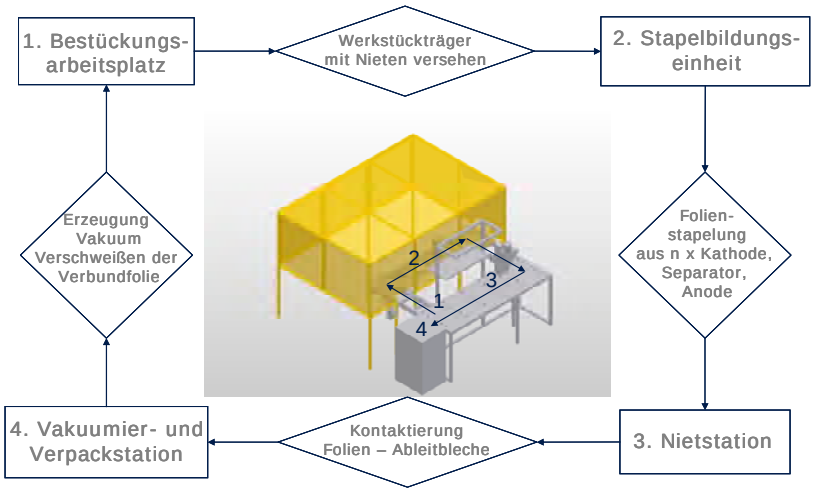


Bild 45: **Prozessablauf der Stapelbildung**

Zur prozesstechnischen Realisierung wurden Anforderungen an ein teilautomatisiertes Stapelbildungssystem formuliert. Dieses soll z.B. in der Lage sein, aus Magazinen, welche die zu stapelnden Einzelfolien mit definierter Lage beinhalten, einen geometrisch exakten und reproduzierbaren Folienstapel zu bilden. Zudem sollte eine Parallelisierbarkeit der Handlingvorrichtungen möglich sein, um prinzipiell großserientaugliche Taktzeiten erreichen zu können. Dabei ist zu beachten, dass eine Querkontamination der Kathoden- und Anodenfolien zwingend zu vermeiden ist. Dafür sind getrennte Greifersysteme vorzusehen.

Automatisierung des Stapelprozesses / Greifertechnologien

Die definierten Anforderungen an die Teilautomatisierung des Fertigungsprozesses wurden in einer Demonstratoranlage (**Bild 46**) umgesetzt. Der Schwerpunkt lag dabei auf der Automatisierung des Stapelprozesses in den Teilschritten der Vereinzelung der Folien beim Greifen vom Folienstapel, der Erkennung der Lage der Folien am Greifersystem und dem Stapeln der Folien zum Zellpaket.



Bild 46: **Anlage zur Herstellung der Pouch-Zellen**

Zur zuverlässigen und schädigungsfreien Handhabung der Folien im Stapelprozess sind spezifisch angepasste Greifersysteme notwendig. Hierzu wurden umfangreiche Untersuchungen zu unterschiedlichen Greifertechniken (Vakuum-Sauggreifer mit Folienaufsatz, Coanda-Greifer und Bernoulli-Greifer) durchgeführt. Deren Bewertung erfolgte u. a. anhand folgender Kriterien:

- zuverlässige Ansaugung ohne Verschiebungsgefahr während des Handlingvorgangs,
- minimale Einzugseffekte (Knittern) bei dünnen Folien,
- geringer Durchsaugeffekt bei permeablen Folien,
- möglichst große Spanne an greifbaren Foliengewichten bei konstanter Saugleistung.

Als besonders geeignet erwiesen sich hierbei die Coanda-Greifer SCG 1xE100 A MA der Firma J. Schmalz GmbH (Glatten), welche eine gute Greifwirkung bei geringer lokaler Verformung der Folien sowie kaum Durchsaugeffekte bei den permeablen Separatorfolien aufwiesen. **Bild 47** zeigt hierzu exemplarisch die Vor- und Nachteile der unterschiedlichen Greifertechnologien auf.

Als Bewegungseinrichtung zum Führen des Greifersystems kommt ein Portal zum Einsatz. In x-/y-Richtung wird die Bewegung durch Zahnriemenachsen realisiert, die Bewegung in z-Richtung erfolgt mittels einer Spindelachse. Die Greiferplattform ist um die z- und die x-Achse schwenkbar. In die Greiferplattform sind Coanda-Greifer integriert. Um einer Querkontamination der Beschichtungen von Anode und Kathode vorzubeugen, sind zwei Greifersysteme an der schwenkbaren Plattform untergebracht, die jeweils die Elektrode und die ihr zugewandte Seite des Separators greifen. Die Greifer müssen dabei einen definierten Abstand zur Folie einhalten, um einerseits den Kontakt mit der Folie und damit einhergehende Beschädigungen zu vermeiden und andererseits ein prozesssicheres Greifen zu gewährleisten. Dazu wurde ein Ultraschallsensor in die Plattform integriert, welcher den Abstand zur Folie überwacht.

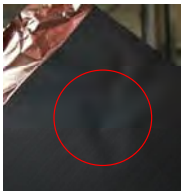
	Vorteile	Nachteile	Greiferabdrücke
Vakuum-Sauggreifer für Folien	• preiswert und unkompliziert • Schaumstoffeinsatz verhindert Einsaugen der Folie	• hinterlässt sichtbare Abdrücke des Greiferrands, welche u.U. zur Beschädigung der Beschichtung führen können	
Coanda-Greifer	• auch bei dünnen Separatorfolien kaum Abdrücke • sehr geringe Schädigungsgefahr • flächige Berührung gewährleistet geringe Gefahr von Querverschiebungen beim Transport	• flächiges Aufliegen der Folie auf Greifer • Kontaminationen möglich	
Bernoulli-Greifer	• wenig berührender Kontakt mit Folie • geringe Kontaminationsgefahr	• saugt Folien teilweise ein, bzw. Schädigung der Folie (s. Abb. rechts) • Gefahr des seitlichen Verrutschens der Folien beim Transport • teuer in Serie, da ständig Luft angesaugt werden muss	

Bild 47: **Vor- und Nachteile der Greifervarianten**

Beim Abnehmen der Folien aus den Magazinen muss gewährleistet werden, dass nur eine Folie am Greifersystem haftet. Dazu wird Druckluft über eine Fächerdüse (**Bild 48**) in den Lagenstapel geblasen, der die Folien separiert. Sollten dennoch beim Abheben Folien aneinander haften bleiben, werden diese durch einen zweiten Luftstrom auf der Gegenseite der Fächerdüse voneinander getrennt.

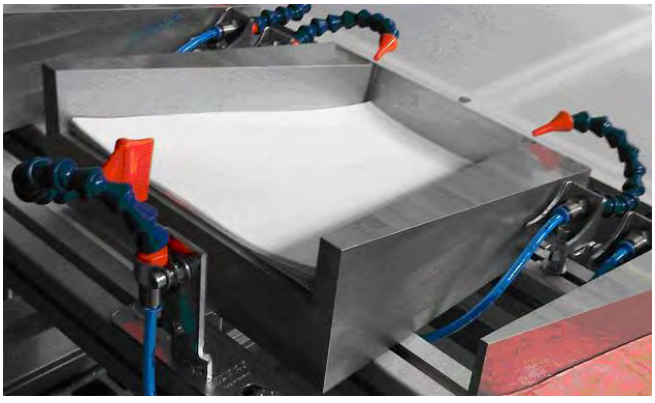


Bild 48: **Druckluftdüsen zum Vereinzeln der Folien**

Montage- und Integrationsprozess

Die Stapelbildung zur Herstellung trapezförmiger LIZ erfolgt mittels der konzipierten und technologisch umgesetzten teilautomatisierten Handlinganlage. Die für die Folienpositionierung erforderlichen Greifer sind in 5 Achsen (3 Translationen, 2 Rotationen) frei beweglich. Zur Herstellung der Zellen wurde ein Stapel aus Kathoden, Separatoren und Anoden in vorausbestimmter Reihenfolge gebildet, indem das Greifersystem jeweils eine Kathode/Separator- bzw. Anode/Separator-Paarung aufnimmt und gerichtet im Werkstückträger ablegt.

Die realisierte Stapelanlage verfügt über die erforderlichen Systeme zur Qualitäts- und Handlingsicherheit. So wurde die Qualitätssicherung mittels optischer Vermessung unter Einsatz eines Durchlichttischs umgesetzt, auf welchem die Folien auf dem Weg vom Magazin zum Werkstückträger zwischengetaktet abgelegt werden. Ein Kamerasystem vergleicht die reale Position mit der Sollposition und gibt Korrekturen an die Greiferkinematik weiter, wodurch eine exakte Positionierung der Folien im Werkstückträger erreicht wird.

Um eine Fixierung des Folienstapels zu gewährleisten, wurde die Kontaktierung der Ableitfahnen untereinander bei den Trapezzellen zunächst mittels Nieten realisiert. Es zeigte sich jedoch, dass der Folienstapel auch ohne diese Maßnahme ausreichend formstabil für die weitere Verarbeitung ist und im Rahmen der Demonstratorfertigung auf diesen zusätzlichen Fertigungsschritt verzichtet werden kann. Der gebildete Stapel wird manuell dem Vakuumier- und Schweißgerät zugeführt und versiegelt, wobei die Ableiterbleche aus der Pouch-Zelle zur Kontaktierung hinausragen. Es entsteht eine Pouch-Zelle mit beliebiger (hier trapezförmiger) Geometrie.

Im folgenden Fertigungsschritt wird an die Pouch-Zelle ein Kunststoffrahmen angespritzt, welcher alle geometrischen Bedingungen zur funktionalen Umsetzung einer Lithium-Ionen-Batterie aus mehreren Zellmodulen aufweist. Dazu wird die Zelle in eine Werkzeugkavität eingelegt und im Randbereich umspritzt. Als Material für die Zelleinfassung dient ein neuartiges, speziell entwickeltes PC-ABS Copolymer der Bayer Material Science AG (Leverkusen) mit inhärentem Flammschutz, welches einen Elastizitätsmodul von 2300 MPa und eine Streckgrenze von 60 MPa aufweist.

Die Zellflächen bleiben beim fertigungsintegrierten Anspritzen der Zelleinfassung von Kunststoff unbenetzt, um im Anwendungsfall eine Wärmeabfuhr durch die Kühlluft und Zellvolumenänderungen bei unterschiedlichen Ladezuständen zu ermöglichen. Die Trennung von Zellfläche und zu umspritzendem Randbereich wird mittels einer Dichtkante im Werkzeug ermöglicht. **Bild 49** zeigt die trapezförmige Pouch-Zelle als Einleger im Spritzgusswerkzeug, welches sich hier im geöffneten Zustand befindet.

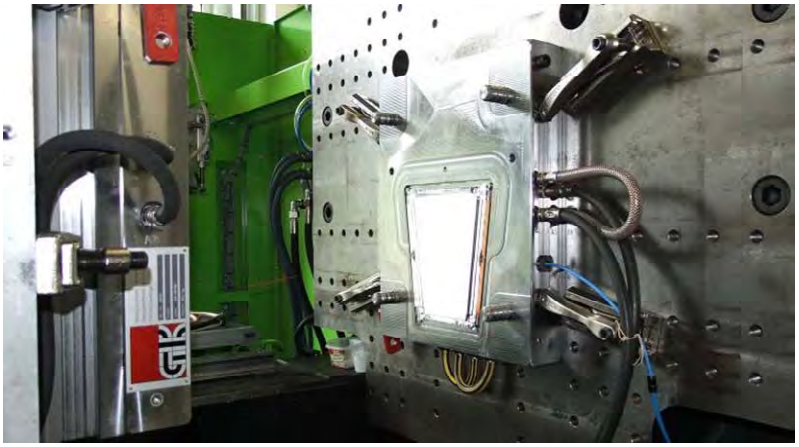


Bild 49: **Werkzeug für Rahmenumspritzung mit eingelegter Trapez-Pouchzelle**

Rückwirkungen auf die LIZ, Thermomanagement

Die zu bildende prismatische Batterie mit trapezförmiger Grundfläche setzt sich aus mehreren Pouch-Zellen zusammen. Um diese zu einem geschlossenen und stabilen Batteriesystem zusammenzufassen, ist eine Zelleinfassung erforderlich. Hierzu wurden die trapezförmigen Pouch-Zellen in einem neuartigen funktionsintegrativen Fertigungsverfahren mit einem Kunststoffrahmen versehen, welcher die nötige Stabilität aufweist und alle erforderlichen Funktionsflächen und -elemente bereitstellt (siehe **Bild 50**). Die Aneinanderreihung erfolgt dabei immer wechselseitig, sodass eine Serienschaltung der Zellen erreicht werden kann.

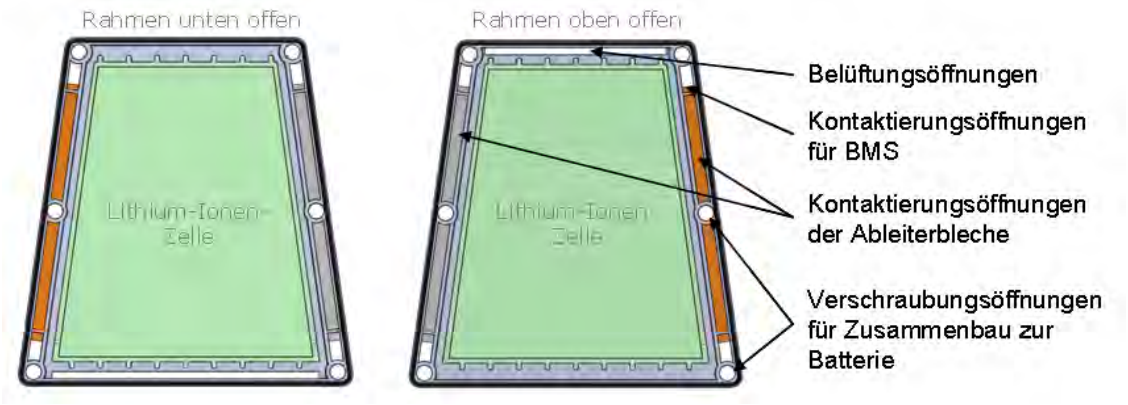


Bild 50: **Rahmenkonzept mit wechselnden Lüftungsöffnungen zur Lenkung des Kühlluftstroms über die Zellflächen**

Für die Steuerung der LIZ sind im entwickelten Rahmen-Konzept entsprechende Öffnungen vorgesehen, welche eine individuelle Zugänglichkeit, d. h. Kontaktierung und somit eine Ansteuerung und Überwachung jedes Einzelmoduls durch das Batterie-Management-System ermöglichen.

Die Integration derartiger funktionsintegrativer Zellen in komplexe Strukturkomponenten führt zu Problemfeldern bezüglich der Überwachung und des Thermomanagements der Batterie. Dazu wurde das zu entwickelnde Batteriemodul mit den vorgesehenen Kühlstrukturen mittels numerischer Methoden untersucht. Anhand derer konnte die Rückwirkungen der Rahmenbauweise auf die Zelltemperatur analysiert werden.

Durch die im Rahmen-Konzept vorgesehenen wechselnden Belüftungsöffnungen entsteht eine „in Reihe geschaltete“ Batteriekühlung, welche einen mäanderförmigen Kühlluftstrom entlang der Zellflächen ermöglicht. Dabei ist die Temperaturdifferenz zwischen erster und letzter Zelle möglichst gering zu halten, um vorzeitige Alterung und Leistungsverlust der vom Kühleinlass entfernter gelegenen Zellen zu vermeiden.

Anhand umfangreicher numerischer Fluidsimulationen zum benötigten Volumenstrom konnte die erwartete Zelltemperatur abgeschätzt werden. So zeigt sich, dass bei Entladung mit 1 C bei einem Kühlluftvolumenstrom von 90 m³/h eine Temperatur zwischen 30 und 40 °C innerhalb der Batterie gewährleistet werden kann. **Bild 51** veranschaulicht hierfür das Belüftungskonzept und den sich einstellenden Kühlluftstrom.

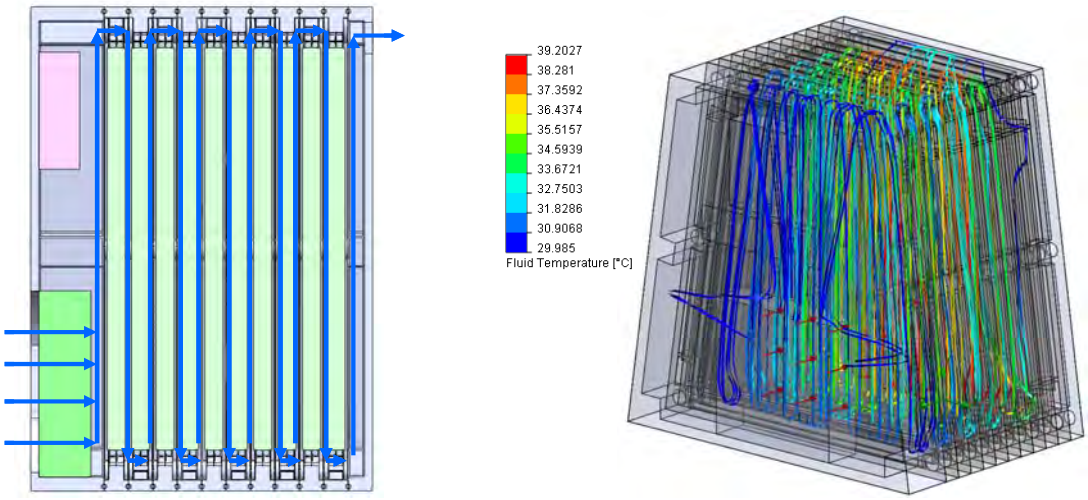


Bild 51: **Belüftungskonzept der modularen Rahmenbauweise (links) und simulierte Luftströmung in der Batterie (rechts)**

Die so gefertigten und hinsichtlich ihrer Kühlung weiter zu optimierenden Zellmodule können in beliebiger Anzahl zu einer Batterie zusammengesetzt werden. Zukünftig umsetzbare Abschlussmodule (Spritzgussdeckel) enthalten das Batterie-Management-System sowie die Belüftungsaggregate. Das entstehende Batteriesystem kann in beliebiger Außengeometrie dargestellt werden (**Bild 52**). Es ist somit hochgradig flexibel ins Fahrzeug integrierbar.

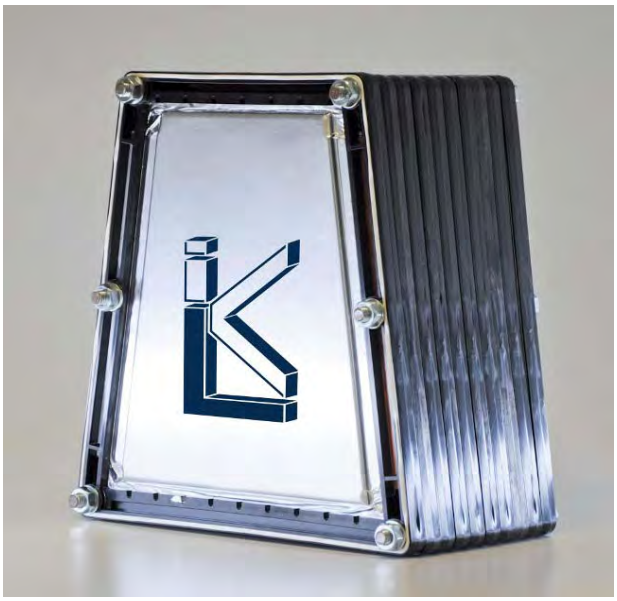


Bild 52: **Batterie aus 10 Zellmodulen mit umspritztem Rahmen**

Untersuchungen zur Integration von LIZ in Strukturkomponenten

Für die Integration von geometrisch unbestimmten Zellformen in Strukturkomponenten wurden Recherchen zur Ermittlung von einzusetzenden Werkstoffen und deren Parameter durchgeführt. Verschiedene Vorversuche zur Auswahl einer geeigneten Formgebungstechnologie wurden durchlaufen. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse flossen in den Entwurf eines Verifikationsbauteils ein.

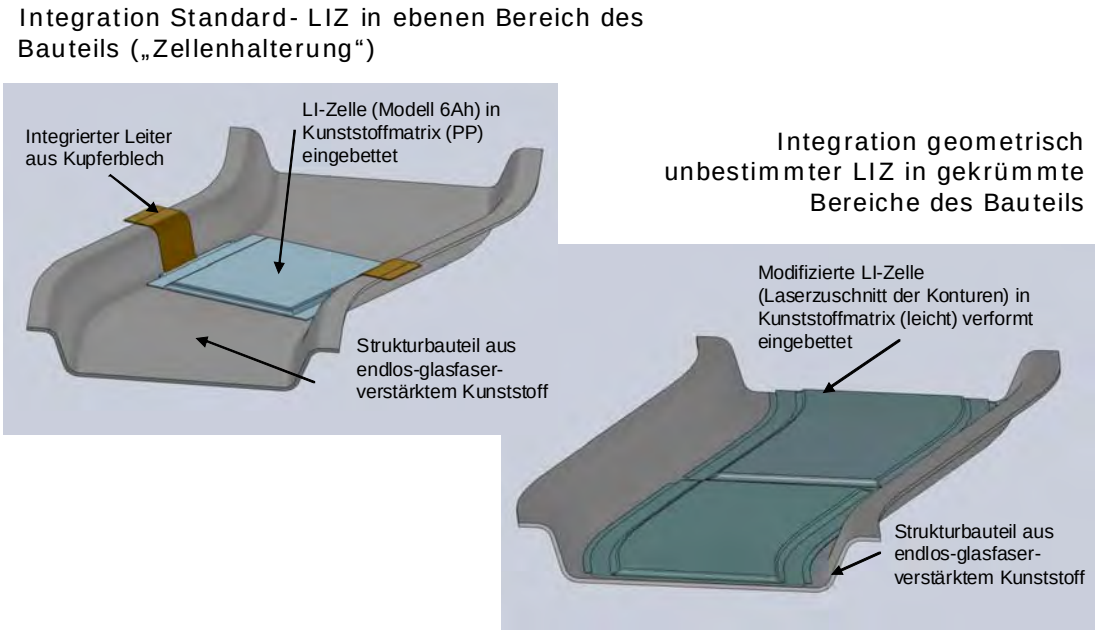


Bild 53: **Gestaltung des Verifikationsbauteils**

Das Verifikationsbauteil hat eine Größe von 300 x 500 mm² und eine doppelt gekrümmte, komplexe 3D-Geometrie, abgeleitet aus der Geometrie einer möglichen Tragstruktur (**Bild 53**). Als Werkstoff für dieses Verifikationsbauteil wurde wegen seiner guten Eignung hinsichtlich Wärmedämmung, elektrische Leitfähigkeit und Einbettungsfähigkeit ein Verbund aus Blech und einem Halbzeug aus Hybridgarn-Textil-Thermoplast (HGTT) ausgewählt.

Die Formgestaltung der Zellen erfolgte unter den Kriterien Konturanpassung und Verschnittfreiheit. **Bild 54** zeigt als mögliche Variante der konturangepassten Zellgestaltung die Form S-Schlag. Verschnitt fällt hierbei nur am Anfang und am Ende eines Coils an und ist somit als minimal zu bezeichnen.

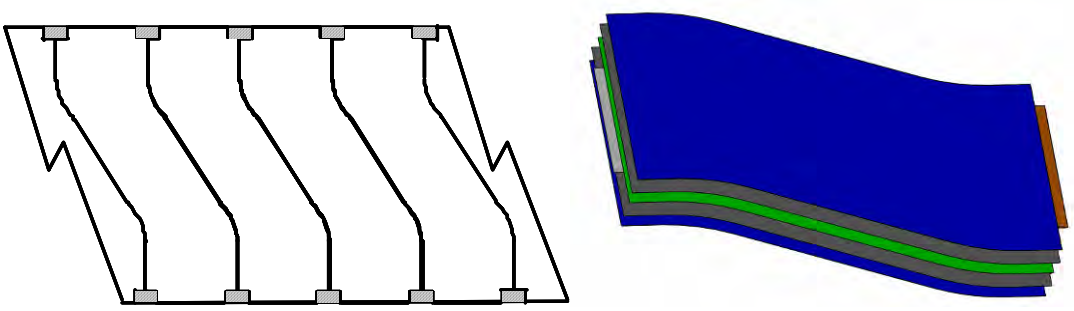


Bild 54: **Mögliche verschnittarme Zuschnitt- (links) und Stapelvariante (rechts)**

Für die Einbettung der geometrisch unbestimmten Zellformen in Strukturkomponenten wurden 2 mögliche Fertigungsvarianten diskutiert und evaluiert.

1. Verarbeitung gefüllter Zellen (Klassisches Stapeln, Befüllen und Verschließen der Zelle --> Formen des Bauteils zusammen mit Zuleitungen --> Einbetten / Verformen der Zelle kurz vor Ende des Konsolidiervorgangs (ca. 120 °C) mit aktiver Kühlung der Zelle

Diese Fertigungsvariante erfordert die Einhaltung eines sehr engen Prozessfensters. So liegt die Rekristallisationstemperatur von Polypropylen (PP) beim Abkühlen und Konsolidieren des Bauteils im Bereich zwischen 130 – 115 °C. Bei niedrigeren Temperaturen ist keine ausreichende Anhaftung der Zellen am Bauteil mehr zu erwarten. Die mit dem Elektrolyten (LiPF6) gefüllten und bereits versiegelten Zellen fangen jedoch bei Temperaturen > 80 °C an auszugasen. Deshalb wäre eine prozessstabile und sichere Kühlung für die einzubettenden Zellen erforderlich, um einerseits die Anbindung der Zellen (letztendlich des Verpackungsmaterials der Zellen) zu ermöglichen, gleichzeitig jedoch das Innere der Zellen (Elektrolyt) sicher unter 80 °C zu halten. Dies würde den Aufbau eines zusätzlichen Kühlkreislaufes erfordern, aber auch umfangreiche Studien mit zusätzlichen Parametern zur Klärung und Absicherung des sehr engen Prozessfensters nach sich ziehen.

2. Verarbeitung ungefüllter Zellen (Vorbereitung der Zellen mit Zuleitungen --> Verformung als Stapel integriert im Formprozess des Bauteils --> anschließendes Befüllen und Verschließen)

Angesichts der zu Fertigungsvariante 1 aufgeführten Problemfelder erscheint diese Fertigungsvariante bei der Integration der geometrisch unbestimmten Zellformen in die Verifikationsbauteile praktikabler. Sie kam deshalb bei den nachfolgenden Versuchen zur Anwendung.

Für die Fertigung eines solchen Verifikationsbauteils war ein prototypisches, modular aufgebautes, variotherm temperierbares Formgebungs- und Montagewerkzeug zu entwickeln und zu bauen. Geeignete Fertigungs- und Gestaltungsmöglichkeiten der Werkzeugaktivelemente sowie der Einbindung der Temperierelemente wurden in Vorversuchen mit einem bereits verfügbaren Formpress-Werkzeug und manuell gefertigten „LIZ-Dummies“ aus ähnlichen Folienmaterialien ermittelt. Anschließend wurde das speziell für konturangepasste Zellen der Form S-Schlag notwendige Werkzeug gefertigt und instrumentiert (**Bild 55**).

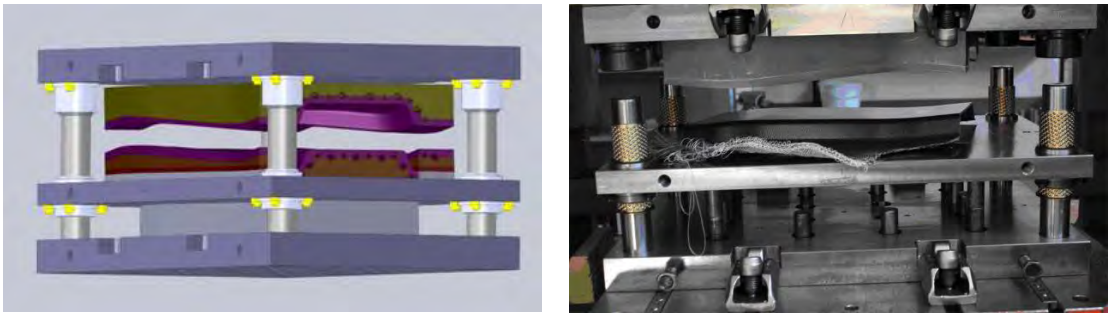


Bild 55: **Variotherm regelbares Umform-Fügewerkzeug; links: Entwurf, rechts: Aufbau in Umformpresse**

Mit Hilfe des Formgebungs- und Montagewerkzeugs erfolgte die Realisierung des Verifikationsbauteils aus faserverstärktem Thermoplast und Blecheinlagen. Dafür wurden Dummy-Zellen (lasergeschnittene Elektroden aus ähnlichen Folienmaterialien, Siegelfolie und Ableiter aus Originalmaterial) gefertigt und in einem gemeinsamen Formprozess mit faserverstärktem Thermoplast (HGTT) und Blechableitern zu einem komplexen Hybrid-Bauteil gefügt (**Bild 56**). Damit wurde die prinzipielle Machbarkeit des gemeinsamen Formens von endlosglasfaserverstärkten Textilien, Blech und Lithium-Ionen-Zellen zu hybriden Bauteilen nachgewiesen.

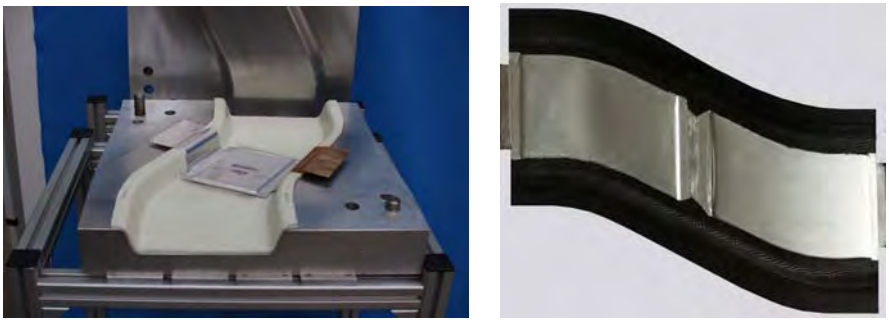


Bild 56: **Bauteil mit eingebetteten Zellen und Ableitern: links: ebener Bereich; rechts: gekrümmter Bereich**

Bei den Formprozessen zur Verarbeitung von Polypropylen-basierten, endlosglasfaserverstärkten Gestricken werden üblicherweise Werkzeugtemperaturen von 200 °C eingestellt. Verluste durch Konvektion, Wärmeleitung und -strahlung führen in Abhängigkeit von Heizleistung und -dauer zu Temperaturen von ca. 190 °C im Gestrick. Für das Schmelzen von PP werden in der Literatur 170 °C ausgewiesen. Bei der Herstellung komplexer Formteile mit echten Zellen ist darauf zu achten, dass die von den Materialien tolerierten Temperaturen nicht überschritten werden.

Unter Berücksichtigung der Bedingungen des Umform-Füge-Prozesses (Temperaturbelastung, hohe Druckbeanspruchung sowie geringe Deformationen durch die 3-D-Kontur des Bauteils) könnten Materialfehler im Mikrobereich entstehen (minimale Abplatzungen der Beschichtungsmaterialien von den Folien, Mikrolöcher im Separator) die zu Einschränkungen der Leistungsfähigkeit bis hin zum Versagen der Zelle führen könnten. Um die hier aufgezeigte Fertigungsvariante von Zellen in hybriden Strukturen anzuwenden, sind weitere umfangreiche Untersuchungen zu den genannten Sachverhalten durchzuführen und ggf. erweiternde Lösungen zu erarbeiten.

Fazit

Geometrisch unbestimmte Zellformen bedürfen neuer Technologien zur Lageerfassung und Positionierung beim Herstellungsprozess. Die Bewertung relevanter Zellgeometrien hinsichtlich Wirtschaftlichkeit und technologischer Relevanz rückte trapezförmigen Zellen in den Fokus nachfolgender Untersuchungen, da sie eine gute Ausnutzung bereits vorhandener Fahrzeugräume erlauben und fertigungstechnisch effizient umsetzbar sind. Im Rahmen des Projektes wurde auch dafür ein automatisiertes Anlagenmodul entwickelt und aufgebaut. Es entnimmt die zu stapelnden trapezförmigen Einzelfolien mittels Coandagreifer aus Magazinen mit definierter Lage und bildet einen geometrisch exakten und reproduzierbaren Folienstapel. Durch ein integriertes optisches Vermessungssystem ist eine exakte Positionierung der Folien sichergestellt.

Die Integration von Lithium-Ionen-Zellen in komplexe Strukturkomponenten führt zu neuartigen Problemfeldern bezüglich der Überwachung und des Thermomanagements der Batterie. Mit Hilfe von Simulationsrechnungen wurde ein Rahmenkonzept mit wechselnden Belüftungsöffnungen evaluiert, welches einen mäanderförmigen Kühlluftstrom entlang der Zellflächen ermöglicht und die Temperaturunterschiede zwischen erster und letzter Zelle gering hält.

Für die Integration der geometrisch unbestimmten Zellformen in Strukturkomponenten wurden mögliche Fertigungsvarianten geprüft und evaluiert. Im Hinblick auf die industrielle Anwendung der Fertigungsvarianten sind weitere Untersuchungen zum Einfluss von Temperatur und Druck auf die Zellmaterialien notwendig.

5.4 Fügen der Folienpakete mit minimalem Übergangswiderstand

Im Bereich des Fügens der Folienpakete konzentrierten sich die Arbeiten ausschließlich auf das Laserstrahlschweißen. Da es im Gegensatz zum Ultraschallschweißen keine mechanische Belastung auf das Folienpaket ausübt, können damit Abrieb von Beschichtungsmaterial und Ablagerung im Separator vermieden werden.

Beim Ultraschallschweißen erfolgt dagegen ein Verschweißen im festen Zustand als eine Folge von inneratomaren Wechselwirkungen. Nachteilig sind jedoch die hohe erforderliche Presskraft und die gleichzeitig laterale Oszillation, die eine hohe Rissgefahr an den Folien zur Folge hat. Die aufgesetzte Sonotrodenspitze kann zudem zu einer lokal stark unterschiedlichen Verschweißung bzw. Anbindung führen, wodurch keine vollflächig-stoffschlüssige Verbindung entsteht (**Bild 57**).

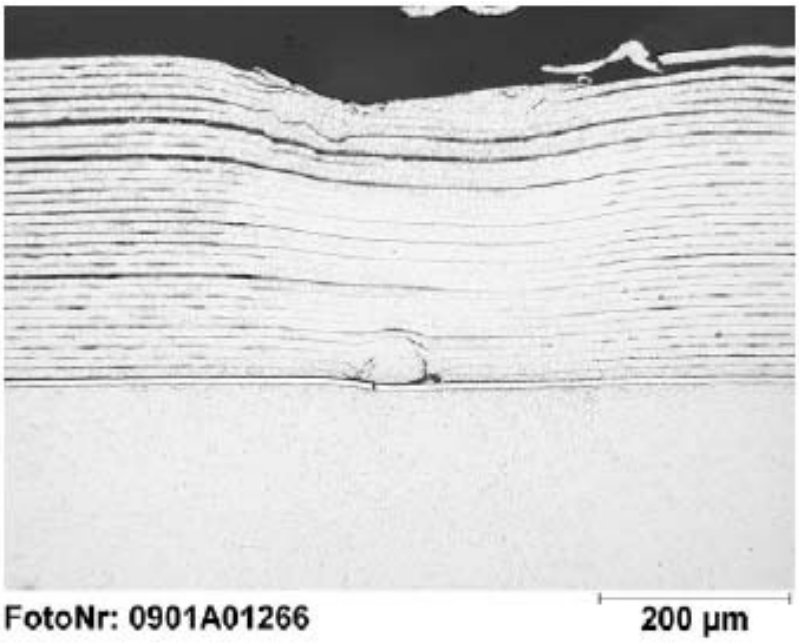


Bild 57: **Metallographischer Querschliff eines ultraschall-geschweißten Folienpaketes**

An das prozesssichere Laserstrahlschweißen von Folien werden durch die hohe Energiedichte des Lasers sowie die starke Reflektion und hohe Wärmeleitfähigkeit des zu schweißenden Materials hohe Ansprüche gestellt. Eine weitere Herausforderung besteht in der Überbrückung des Luftspaltes zwischen den 20 bis 30 Folien eines Folienpaketes. Während die Foliendicke nur 10 µm (Cu) bzw. 20 µm (Al) beträgt, misst sich der Luftspalt zwischen zwei Folien in Abhängigkeit von der Folienbeschichtung ca. 100 µm.

Zur Erzielung eines geringen Übergangswiderstandes sind die Folien möglichst spaltfrei zu verschweißen. Das Beschichtungsmaterial innerhalb des Folienstapels darf dabei nicht durch die Temperatur geschädigt werden.

Um dies zu realisieren wurden die jeweils 500 µm dicken Cu- oder Al-Ableiter durch die Folien hindurch gegen ein ca. 300 µm dickes Verstärkungsblech des gleichen Werkstoffes gepresst und unter statischem Druck damit verschweißt. Durch das Laserstrahlschweißen ergibt sich über alle Folien hinweg eine stoffschlüssige und somit gut leitfähige Verbindung zu den Ableitern (**Bild 58**).

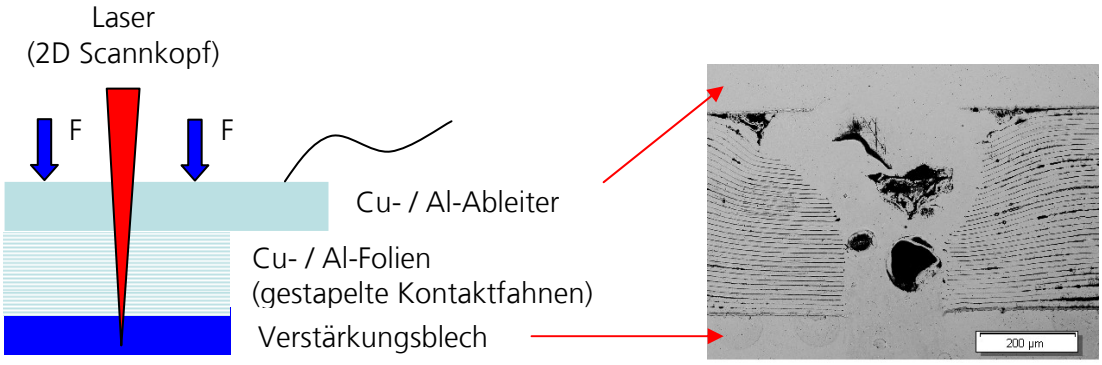


Bild 58: **schematische Darstellung der Fügestellenkonfiguration (links) und Querschliff eines geschweißten Folienpaketes aus Kupfer (rechts)**

Für die Untersuchungen zum Laserstrahlschweißen der Folienpaket wurden unterschiedliche Laser, bspw. der in **Bild 59** abgebildete 1 kW Single-Mode-Faserlaser der Firma IPG verwendet. Die Optimierung der Prozessparameter erfolgte unter Berücksichtigung der Anforderungen hinsichtlich:

- eines geringen elektrischen Widerstand der Verbindung,
- hinreichender mechanischer Stabilität (Abrisskraft)
- minimaler thermischer Beeinflussung der Beschichtung (möglichst keine Schädigung).

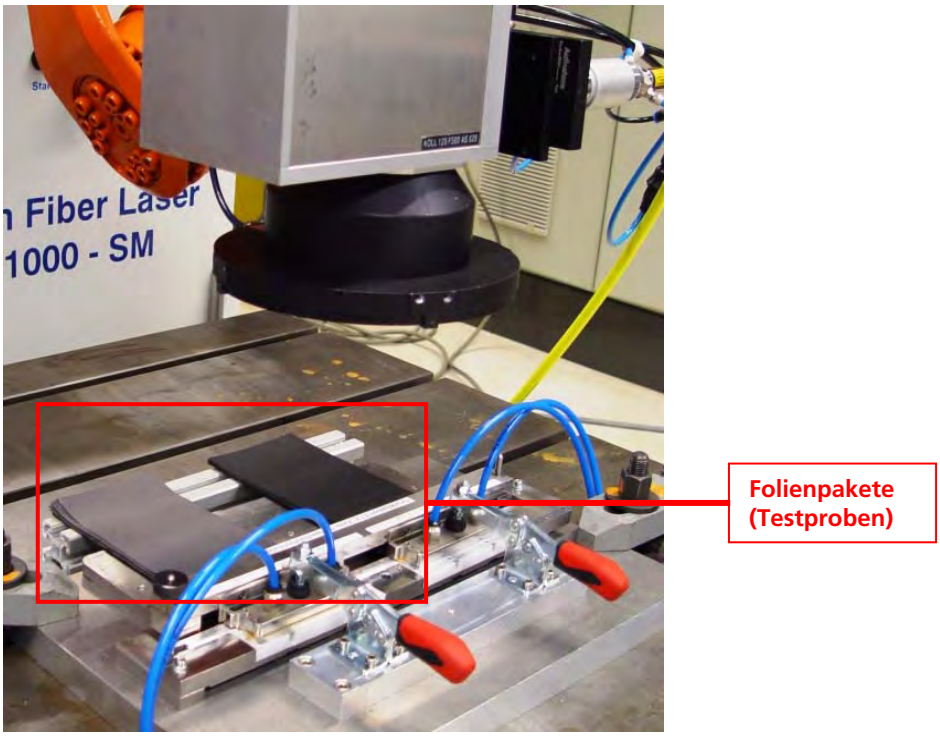


Bild 59: **Versuchsaufbau beim Laserstrahlschweißen**

In Abhängigkeit von der Schweißgeometrie (Linien, Wellenlinien, Kreise, Ellipsen u. a.) kann die Anbindefläche variiert werden. Somit ergibt sich hiermit weiteres Optimierungspotenzial für ein Nahtdesign, welches den jeweiligen mechanischen Belastungen angepasst werden kann.

Für eine Wellenlinie von 100 mm Gesamtlänge (3 mm Amplitude, 1 mm Wellenlänge) ergibt sich unter Nutzung eines 5 kW Faserlasers eine Schweißzeit von 2,3 s für beide Ableiter zusammen (**Bild 60**).

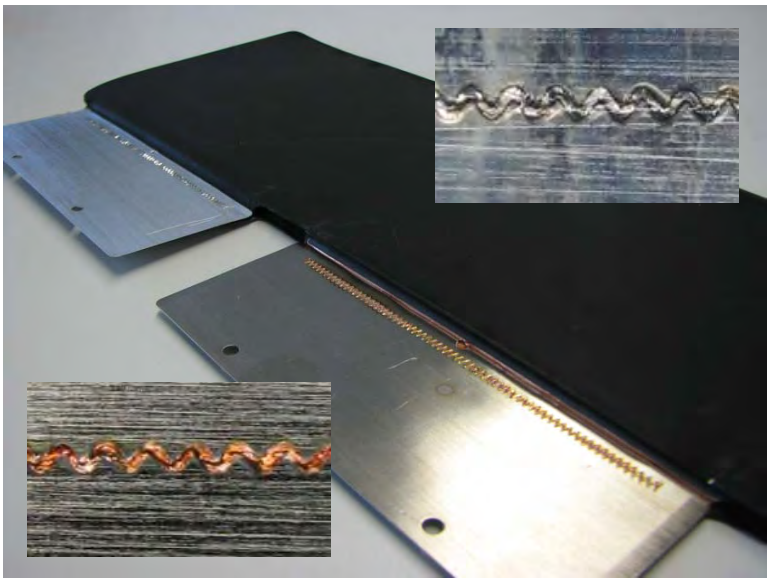


Bild 60: **Beispiel lasergeschweißter Ableiter**

An ausgewählten Proben erfolgte die Bestimmung des elektrischen Leitwertes mit Hilfe einer 4 Punktmessung bei höheren Stromstärken ab 200 A (**Bild 61**). Den Messergebnissen liegen Proben mit einer Anbindefläche von 10 x 1 = 10 mm^2 für die Laser-Schweißverbindungen und von 6 x 4 = 24 mm^2 für die Ultraschall-Schweißverbindungen zugrunde. Der elektrische Leitwert bezogen auf den Anbindungsquerschnitt liegt für lasergeschweißte Verbindungen aus Al bei $3{,}5*10^{-4}$ S/mm^2 und damit deutlich höher als für Ultraschallschweißungen ($1{,}7*10^{-4}$ S/mm^2). Gleiches gilt für die geschweißten Cu-Verbindungen (Laser: $3{,}8*10^{-4}$ S/mm^2; Ultraschall: $2{,}5*10^{-4}$ S/mm^2).

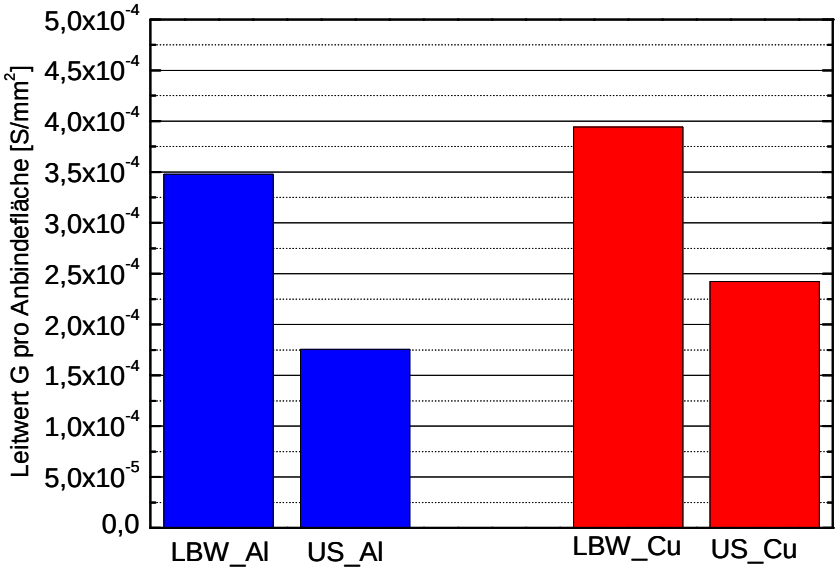
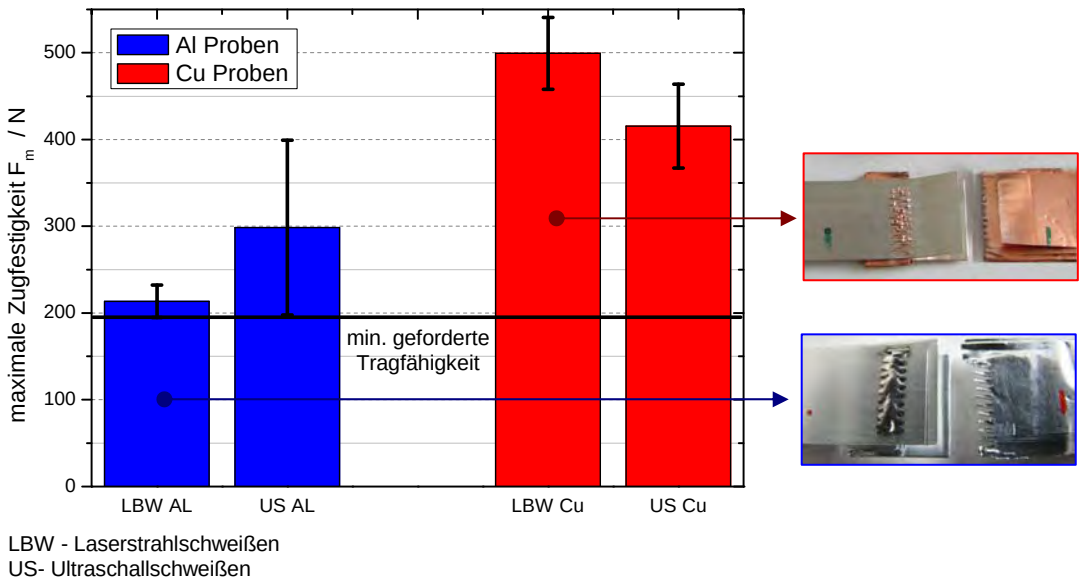


Bild 61. **Vergleich der gemessenen Leitwerte bezogen auf Verbindungsquerschnitt**

Die Bestimmung der Abrissfestigkeit erfolgte im Zugversuch an Proben mit einer Schweißlänge von 10 mm und an ultraschallgeschweißten Proben (**Bild 62**).



LBW - Laserstrahlschweißen
US- Ultraschallschweißen

Bild 62: **Vergleich der Abrissfestigkeit**

Fazit

Im Rahmen des Projektes wurden umfangreiche Untersuchungen zum Fügen der Folienpakete durch Laserstrahlschweißen durchgeführt. Prozessparameter und Spannbedingungen wurden variiert und hinsichtlich hoher elektrischer Leitfähigkeit, mechanischer Festigkeit und Reproduzierbarkeit optimiert. Ein Vergleich technologischer Anforderungen und deren Erfüllung sind in nachfolgender **Tabelle 8** gegenübergestellt.

Tabelle 8: **Vergleich technologischer Anforderungen und deren Erfüllung**

	Ultraschallschweißen	Laserstrahlschweißen
Schweißzeit	--	++
Werkzeugstandzeit	--	++
Prozessstabilität	00	0-
Schweißnahtdefekte	00	0-
Zugfestigkeit	00	0+
Elektrische Leitfähigkeit	00	0+
Legende: o…erfüllt derzeitige technische Anforderungen, + … verbesserte Eigenschaft, - … limitierender Faktor		

Das Laserstrahlschweißen erreicht und übertrifft in vielen Bereichen die Qualität der Ultraschallschweißungen und besitzt somit hohes Potenzial für die industrielle Einführung. Es ist für die Integration in den Fertigungsprozess und durchgängige Automatisierung sehr gut geeignet. Die aus dem Laserstrahlschweißen resultierende Temperaturbelastung ist für die Zelle insgesamt vernachlässigbar. Methoden zur zerstörungsfreien Prüfung und on-line Prozessüberwachung der Schweißverbindung sind in der Entwicklung.

5.5 Oberflächenaktivierung im Bereich Kontaktfahnen

Zur Gewährleistung einer dichten und langzeitbeständigen Verbindung der einzelnen Zelllagen bedarf es im Bereich der Al-Ableiter einer gezielten Vorbehandlung. Derzeit wird hierfür auf das Verfahren der Zr-Fluorid-Behandlung zurückgegriffen. Bei diesem Verfahren wird durch die chemische Behandlung des Substrats eine komplexe ZrO-Schicht gebildet, um die Haftfestigkeit während und nach dem Siegeln zu verbessern.

Voruntersuchungen zeigten, dass insbesondere die Langezeitbeständigkeit unzureichend ist. Darüber hinaus wiesen die vorbehandelten Oberflächen ein ungleichmäßiges Alterungsverhalten auf. Innerhalb des Projekts wurden deshalb die Möglichkeiten der Laservorbehandlung von Al-Ableiterbleche im Vergleich zur Chromatierung (Benchmark) und zu einer einfachen Lösungsmittelreinigung (Referenz) eingehend betrachtet.

Die Ableiterbleche (Kontaktfahnen) aus Reinstaluminium wurden vor den Versuchen in Längsrichtung etwa mittig geteilt. Eine Hälfte (die Referenzproben) wurden vor dem Siegeln mit Aceton durch Wischen sowie Tauchen im Ultraschallbad gereinigt. Die zweite Hälfte wurde einer Laservorbehandlung unterzogen. Die chromatierten bzw. mit Zr-Fluorid (ZrF) behandelten Bleche bedurften aufgrund der bereits vorab aufgebrachten Konversionsbeschichtung keiner weiteren Vorbehandlung.

Die für die Laservorbehandlung optimalen Vorbehandlungsparameter wurden in einem iterativen Prozess anhand von Vorversuchen ausgewählt. Nur mit den erfolgversprechendsten Parametern erfolgte anschließend die Vorbehandlung der Ableiterbleche. In Längsrichtung wurde das gesamte Blech vorbehandelt, die Vorbehandlungsbreite entsprach etwa der Breite des Siegelbandes.

Oberflächencharakterisierung

Bild 63 zeigt eine Zusammenstellung von REM-Aufnahmen der verschiedenen Oberflächenvorbehandlungen. Es ist deutlich zu erkennen, dass jede Vorbehandlung zur Ausbildung einer charakteristischen Oberflächetopografie führt. Die Riefenstruktur auf der lösungsmittelgereinigten Oberfläche ist auf den Walzprozess während der Herstellung der Al-Ableiter zurückzuführen. Ansonsten sind erwartungsgemäß keine Veränderungen der Oberfläche zu erkennen.

Nach der ZrF-Behandlung ist die Aluminiumoberfläche mit einer entsprechenden Konversionsschicht überzogen. Die spröde Schicht neigt zur Rissbildung. Im unteren Bildbereich hat sich die Beschichtung im dargestellten Ausschnitt bereits vollständig von der Oberfläche abgelöst oder liegt lose auf der Oberfläche vor.

Beim Chromatieren wird die Oberfläche durch den Säureangriff teilweise angelöst. Dieser Effekt äußert sich in einer Abschwächung der Riefenstruktur, welche nach dem Chromatieren nur noch schwach im Hintergrund zu erkennen ist.

Durch die Laservorbehandlung wird der Al-Ableiter im oberflächennahen Bereich angeschmolzen. Die Bearbeitung resultiert in einer stark veränderten Oberflächentopografie, welche vorwiegend von verfestigten Schmelzpartikeln geprägt ist. Die wahre Oberfläche wird durch diesen Prozess gegenüber der geometrischen Oberfläche um ein Vielfaches vergrößert.

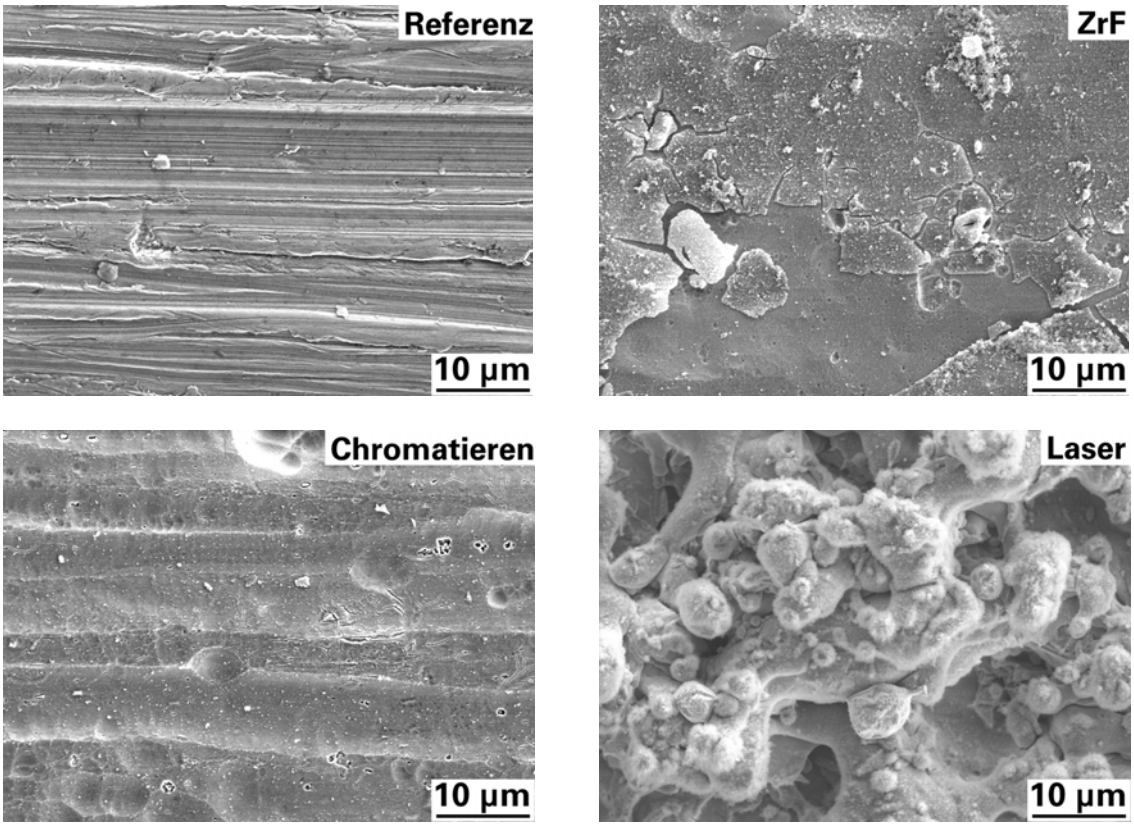


Bild 63: **REM-Aufnahmen der vorbehandelten Aluminiumoberfläche**

Aus den zugehörigen EDX-Spektren (**Bild 64**) lassen sich die Veränderungen der Elementzusammensetzung im oberflächennahen Bereich (etwa 0,8 µm) ablesen. Erwartungsgemäß weist die lösungsmittelgereinigte Oberfläche nur eine niedrige Sauerstoffkonzentration auf, welche auf die dünne natürliche Oxidschicht (3 - 4 nm) zurückzuführen ist.

Nach der Behandlung mit ZrF wird die natürliche Aluminiumoxidschicht durch eine komplexe ZrO-Schicht bedeckt. Im Elementspektrum ist die Veränderung anhand der gestiegenen Sauerstoff- und Zirkonkonzentration nachweisbar. Ein deutlicher Anstieg der Sauerstoffkonzentration wird durch die Chromatierung der Oberfläche erzielt. Durch die chemische Behandlung der Oberfläche mit Chromsäure wird die natürliche Aluminiumoxidschicht verstärkt und gleichzeitig eine Cr_xO_y-Schicht gebildet. Auch die Laservorbehandlung führt zu einer Anhebung der messbaren Sauerstoffkonzentration. Letztere ist auf den Wärmeeintrag während der Vorbehandlung zurückzuführen, welcher lokal ein verstärktes Oxidschichtwachstum anregt.

In **Bild 65** ist die Elementanalyse des unbeschichteten Teilbereichs der mit ZrF behandelten Oberfläche aus Bild 63 dargestellt. Im Unterschied zum beschichteten Bereich sind die Sauerstoff- und Zirkonkonzentrationen deutlich abgesenkt. Der Sauerstoffgehalt entspricht der Konzentration einer natürlichen Aluminiumoxidschicht.

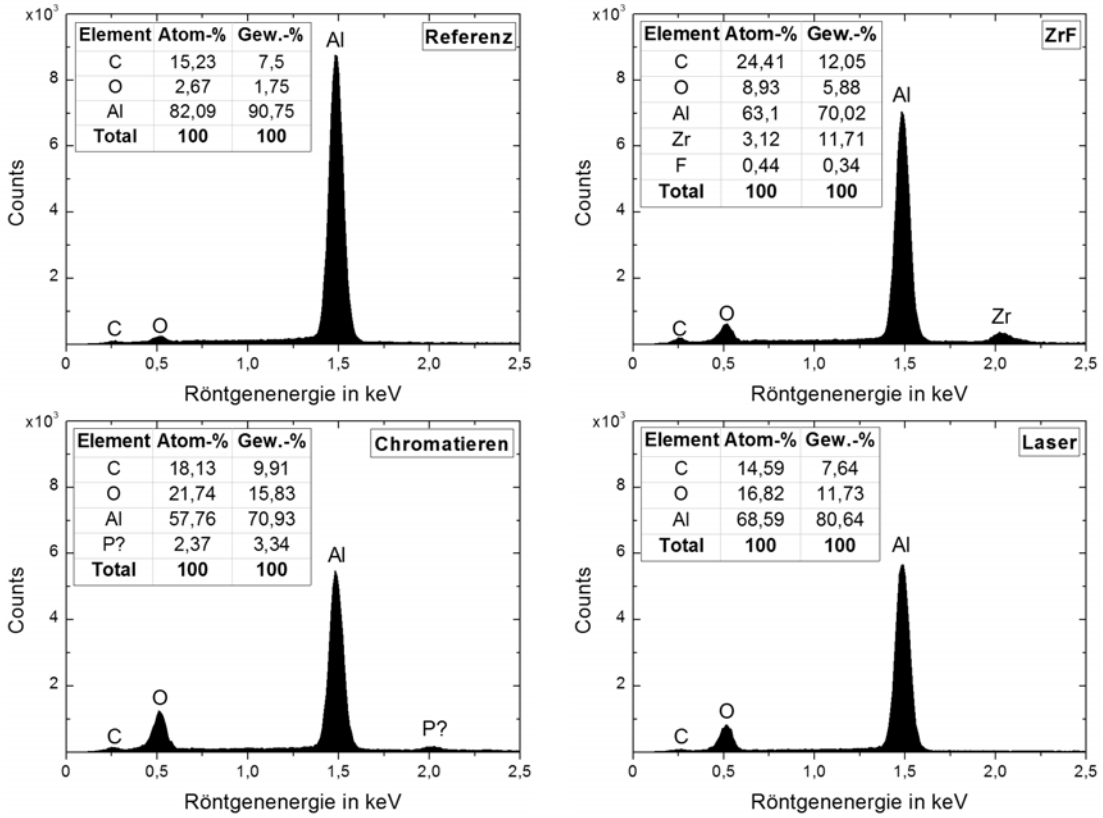


Bild 64: **EDX-Spektren der vorbehandelten Oberflächen**

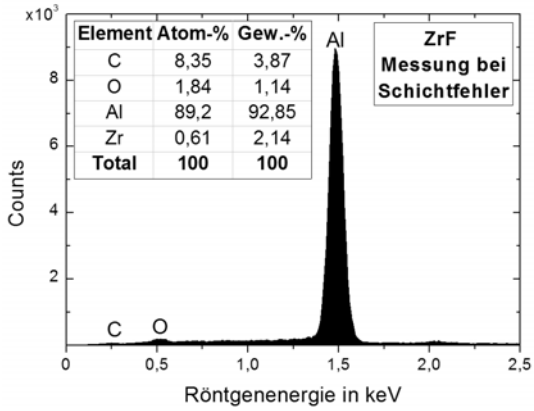


Bild 65: **EDX-Spektrum des Schichtfehlers bei ZrF-Beschichtung (s. Bild 63)**

Bild 66 zeigt TEM-Aufnahmen des oberflächennahen Bereichs beispielhaft für die Referenzoberfläche (Lösungsmittel) und für die laserbehandelte Oberfläche. Beim direkten Vergleich der beiden Aufnahmen wird die Veränderung der Oxidschicht durch den Vorbehandlungsprozess deutlich. Während auf der Referenzoberfläche die natürliche Oxidschicht (3 - 4 nm) nur schwach zu erkennen ist, tritt die Oxidschicht der laserbehandelten Oberfläche deutlich hervor. Letztere zeichnet sich durch einen dichteren Anteil im Bereich des Metallsubstrats (Barriereschicht) und durch einen poröseren Anteil im oberflächennahen Bereich (Deckschicht) aus.

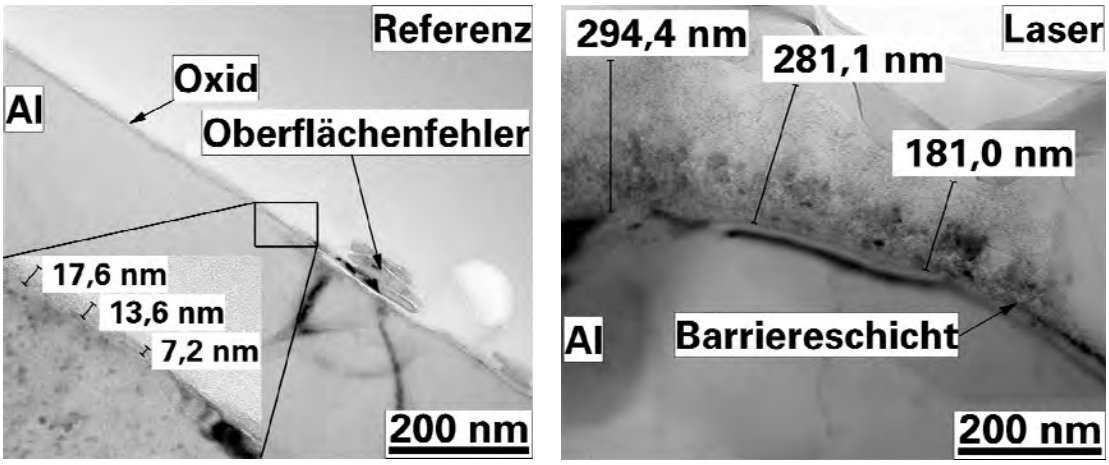


Bild 66: **TEM-Aufnahmen der Referenzoberfläche und der Laseroberfläche**

Siegelprozess, Alterung und Prüfung

Im Anschluss an die Vorbehandlung der Oberflächen wurde das Siegelband durch einen Heißsiegelprozess aufgebracht. Die Siegelparameter (Temperatur, Druck, Zeit) entsprachen den Vorgaben der Fa. Li-Tec. Hierfür wurde eine Heißsiegelmaschine vom Typ HCT 3000 der Fa. Kopp verwendet. Um den Anforderungen an einen 180°-Schälversuch nach DIN EN ISO 8510 zu entsprechen, wurde das Siegelband auf die etwa 10 cm langen Ableiterbleche nur im Bereich der ersten 8 cm (Siegelbereich) gesiegelt (**Bild 67**). Auf den verbleibenden 2 cm (Einspannbereich) erfolgte keine Siegelung. Dieser Bereich wurde nach dem Umklappen des Siegelbandes für die Einspannung des Ableiterblechs in die Materialprüfmaschine genutzt (**Bild 68**).

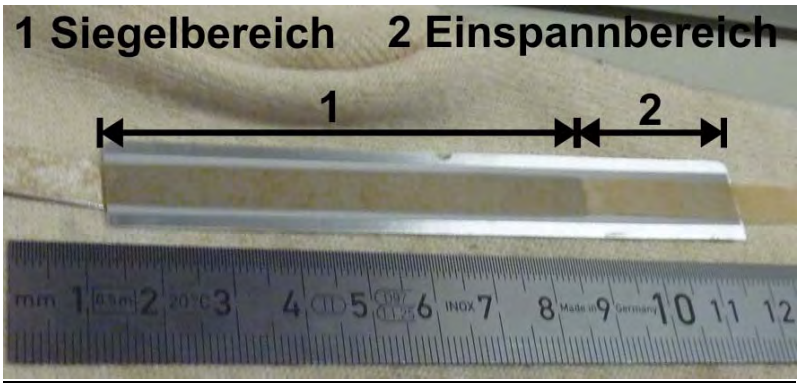


Bild 67: **Ableiterblech nach Siegelprozess**

Die Alterung erfolgte in fest verschlossenen PP-Flaschen durch vollständiges Eintauchen der gesiegelten Probenbleche in einen Elektrolyten (LP71 SelectiLyte™, Fa. Merck). Anschließend wurden die Behältnisse 7 Tage bei 80 °C in einem Wärmeschrank gelagert. Nach dem Abschluss der Alterung wurden die Proben aus dem Elektrolyten entnommen und überschüssiger Elektrolyt durch vorsichtiges Abtupfen der Bleche entfernt.

Für die Prüfung wurden die Proben in eine Zugprüfmaschine (Z050, Fa. Zwick) eingespannt (**Bild 68**). Das Blech wurde hierfür einseitig im oberen Spannfutter und das umgeschlagene Siegelband im unteren Spannfutter befestigt. Die Prüfung erfolgte nach dem Erreichen der Vorkraft (0,1 N) mit einer Geschwindigkeit von 10 mm/min.



Bild 68: **Proben nach der Alterung (links) und Schälversuch (rechts)**

Eine Prüfung der lösungsmittelgereinigten Probenbleche war aufgrund des vollständigen Ablösens des Siegelbandes während der Alterung nicht möglich. Die mit ZrF behandelten Ableiterbleche zeigten einen starken Festigkeitsrückgang, welcher bereits vor der Prüfung durch das partielle Ablösen des Siegelbandes zu erkennen war. Diese Schädigung wirkte sich unmittelbar auf die ermittelten Schälfestigkeiten aus. Alle geprüften Ableiter wiesen ein vollständig adhäsives Versagen, also ein rückstandsfreies Ablösen des Siegelbandes, auf (**Bild 69**).

Sowohl bei den chromatierten Blechen als auch bei den laservorbehandelten Proben war nach der Alterung kein sichtbares Versagen der Haftung zwischen Siegelband und Ableiterblech zu erkennen. Während der Prüfung konnte nur im Anfangsbereich das Siegelband vom Ableiterblech abgelöst werden. Im weiteren Prüfverlauf kam es zu einer Dehnung des Siegelbandes und letztlich zum vollständigen Versagen. Ein weiteres Ablösen des Siegelbandes war aufgrund der hohen Adhäsion zwischen Blech und Siegelband und der niedrigen Materialfestigkeit des Siegelbandes nicht möglich.

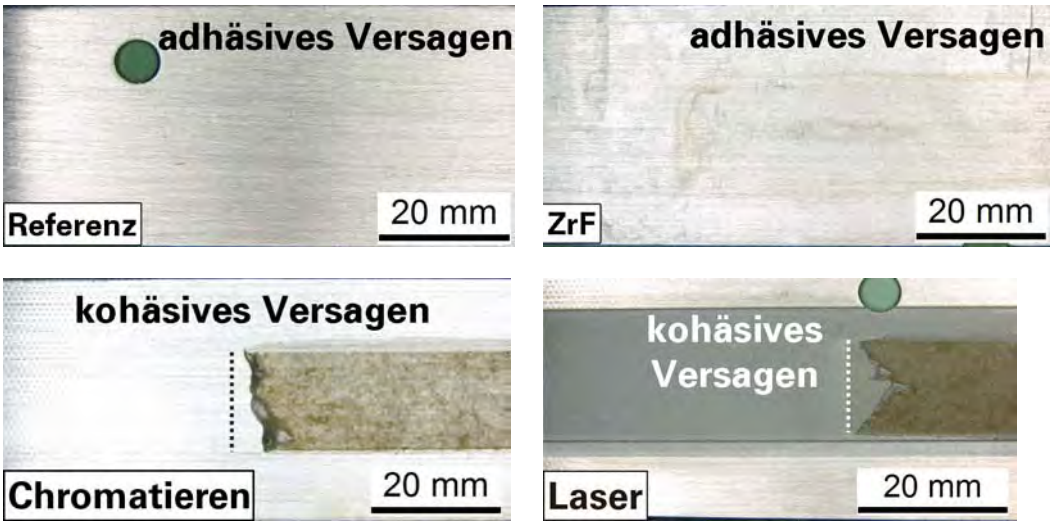


Bild 69: **Ableiterbleche nach der Prüfung der Schälfestigkeit**

Versuche zum direkten Siegeln der Verbundfolie

Die vorangegangenen Untersuchungen zur Haftfestigkeit des PP-Siegelbandes zeigten, dass die Laservorbehandlung die Alterungsbeständigkeit der Kontaktierung verbessert und mit den Ergebnissen für chromatierte Oberflächen vergleichbar ist.

In weiterführenden Versuchen sollte untersucht werden, ob durch die Vorbehandlung mittels Laser auf das Einlegen eines Siegelbandes verzichtet werden kann. Bei den Versuchen wurden erneut die Festigkeitsergebnisse für die vier verschiedenen Vorbehandlungsmethoden Lösungsmittel (Referenz), Zr-Fluorid-Behandlung, Chromatierung (Benchmark) und Laservorbehandlung miteinander verglichen. Hierfür wurde die Verbundfolie mit der PP-beschichteten Seite direkt auf die vorbehandelte Oberfläche gesiegelt. Für die Kontaktierung wurden die Siegelparameter (Druck, Temperatur, Zeit) entsprechend den Vorgaben der Fa. Li-Tec angepasst. Alterung und Prüfung entsprachen den bekannten Abläufen aus den PP-Siegelversuchen.

In **Bild 70** sind die Ableiterbleche nach dem Siegelprozess für die untersuchten Vorbehandlungsvarianten jeweils für das PP-Siegelband und die Verbundfolie vergleichend dargestellt. In einem zweiten Schritt wurde die PP-Beschichtung der Verbundfolie vorab einer Plasmavorbehandlung unterzogen, um die Reaktivität der unmodifizierten PP-Schicht für den Siegelprozess zu optimieren.

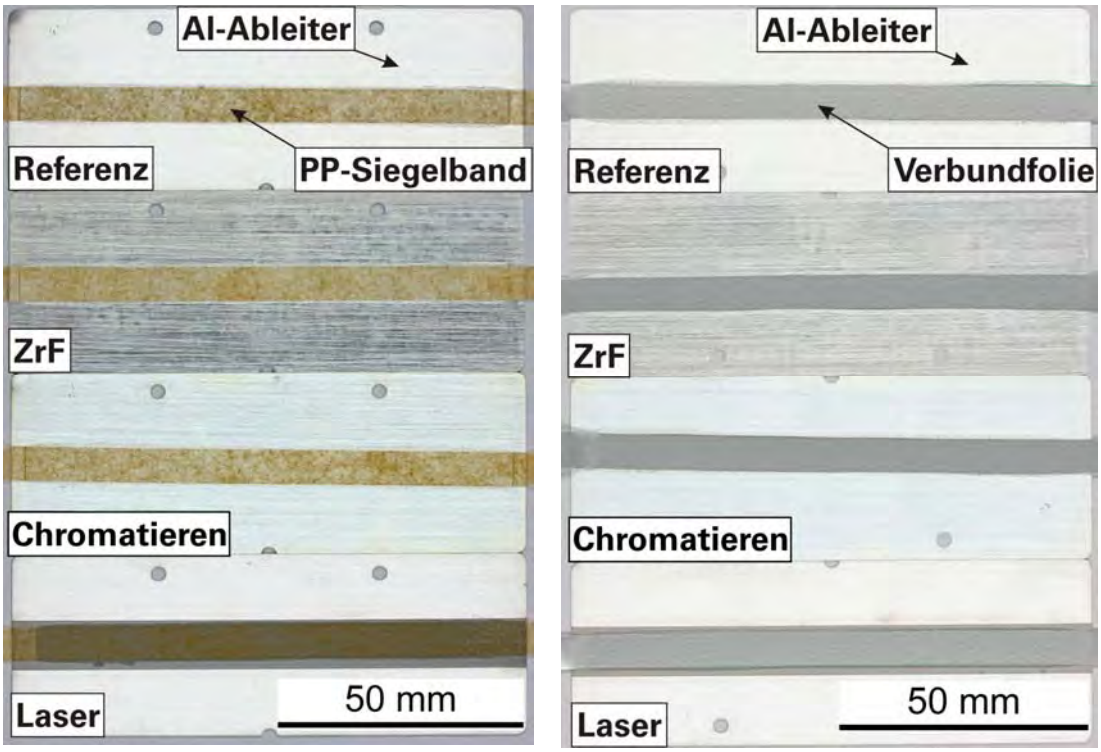


Bild 70: **Vergleich von Ableiterblechen mit Siegelband (links) und Verbundfolie (rechts)**

Die Messung der Schälfestigkeit nach der Alterung zeigt, dass Lösungsmittelreinigung, ZrF-Behandlung und Chromatierung für einen dauerhaften Halt der gesiegelten Verbundfolie auf der Oberfläche nicht ausreichen. In allen drei Fällen versagt die Verbindung zwischen Verbundfolie und Al-Ableiter adhäsiv. Auslöser hierfür ist eine Unterwanderung der Siegelnaht durch den Elektrolyten während der Alterung.

In **Bild 71 links** ist das charakteristische Ablöseverhalten beispielhaft anhand der mit Zr-Fluorid behandelten Oberfläche dargestellt. Die Verbundfolie wird während der Zugversuche rückstandsfrei von der Aluminiumoberfläche entfernt. Ein messbarer Unterschied bei der Schälfestigkeit ist bei Lösungsmittelreinigung, ZrF-Behandlung und Chromatierung nicht festzustellen. Die mittleren Festigkeiten liegen unterhalb von 1 N bei einer gleichzeitigen hohen Streuung der Messwerte.

Ein deutlich verbessertes Alterungsverhalten kann auf den laservorbehandleten Oberflächen ermittelt werden. Das Versagensverhalten ist bei allen untersuchten Proben durchweg kohäsiv. In **Bild 71 rechts** ist das Ablöseverhalten während der Prüfung dargestellt. Darin ist zu erkennen, dass die Verbindung nicht zwischen der vorbehandelten Oberfläche und der PP-Beschichtung versagt, wie dies bei adhäsivem Schädigungsmechanismen der Fall ist, sondern im Schichtaufbau der Verbundfolie. Die PP-Beschichtung der Verbundfolie verbleibt indessen auf der laservorbehandelten Oberfläche.

Die optische Auswertung des Bruchbildes zeigt, dass die PP-Schicht fest mit der aufgerauten Oberfläche verbunden ist. Ein scharfer Übergang zwischen PP und dem Al-Ableiter ist nicht zu erkennen. Die Alterungsbeständigkeit wird durch die stoffschlüssige Verbindung zwischen Al-Oberfläche und PP-Beschichtung signifikant verbessert. Die mittleren Schälfestigkeiten liegen bei 19,5 N und übersteigen damit die Festigkeit der anderen Oberflächenbehandlungsmethoden deutlich.

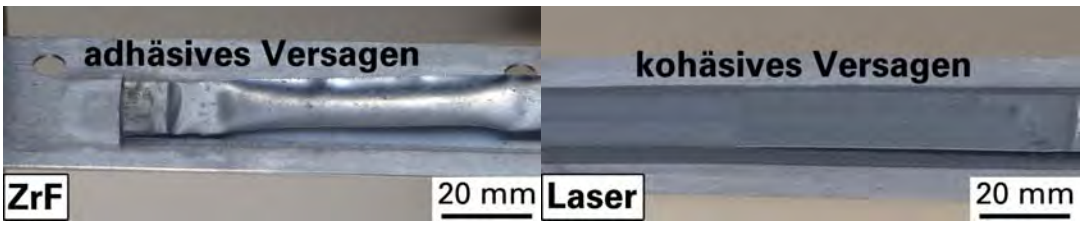


Bild 71: **Prüfung der Haftfestigkeit durch Schälprüfung**

In weiterführenden Untersuchungen wurde anschließend die Wirkung einer Plasmavorbehandlung zur Vorbehandlung der PP-Beschichtung des Siegelbandes bzw. der Verbundfolie untersucht. Sie bewirkt keine messbare Veränderung der Festigkeiten und Alterungsbeständigkeit. Nach der Plasmabehandlung der Verbundfolie ist mittels Kontaktwinkelmessung zwar eine deutliche Verbesserung des Benetzungsverhaltens zu erkennen (**Bild 72**), aber dies wirkt sich nicht auf die Festigkeit und Alterungsbeständigkeit aus. Die Ursache dafür liegt sicherlich im Aufschmelzen der PP-Schicht.

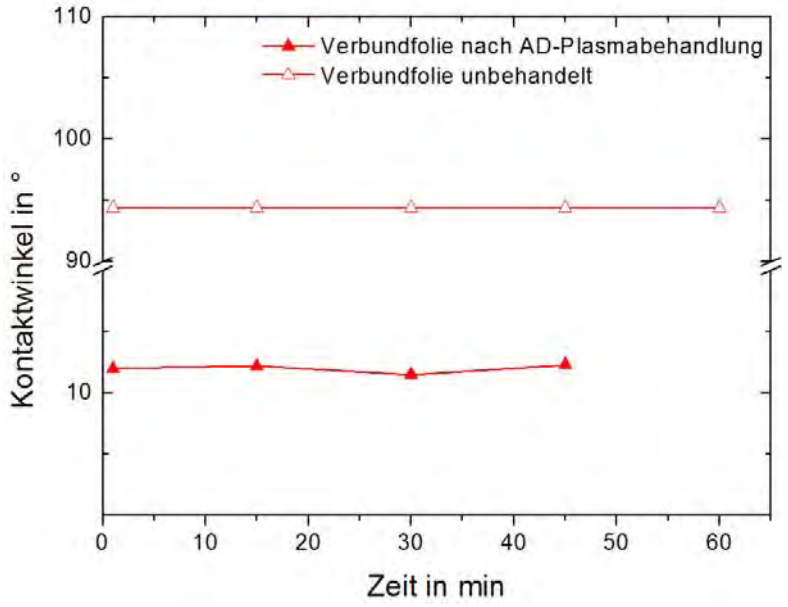


Bild 72: **Kontaktwinkelmessung vor und nach der Plasmavorbehandlung der Verbundfolie**

Fazit

Die Untersuchungen zur Kontaktierung des PP-Siegelbandes zeigen, dass weder die Lösungsmittel- noch die ZrF-Behandlung für eine dauerhafte Beständigkeit der Siegelnaht gegenüber den Alterungsseinflüssen geeignet sind. In beiden Fällen versagen die Verbindungen adhäsiv durch Unterwanderung der Verbindung während der Alterung. Dieses Ergebnis ist für die einfache Lösungsmittelvorbehandlung zu erwarten, da die natürliche Aluminiumoxidschicht nur einen unzureichenden Schutz vor einem korrosiven Angriff bietet. Der Nutzen einer ZrF-Behandlung für einen dauerhaften Schutz vor korrosiven Medien konnte nicht nachgewiesen werden. Insbesondere durch die Rissbildung der ZrO-Schicht und die dadurch initiierte partielle Schichtablösung wird eine Schädigung begünstigt.

Die Chromatierung führt erwartungsgemäß zu einer deutlichen Verbesserung der Alterungsbeständigkeit. Auch nach Abschluss der Alterung ist das Siegelband noch fest mit der vorbehandelten Oberfläche verbunden. Bei der Prüfung der Schälfestigkeit versagt die Verbindung zwischen Siegelband und Oberfläche zunächst kohäsiv, bis nach wenigen Millimetern ein vollständiges Versagen des Siegelbandes aufgrund der niedrigeren Materialfestigkeit eintritt. Die gute Beständigkeit ist auf die erzeugte Aluminiumoxid- und Cr_xO_y-Schicht zurückzuführen, welche eine frühzeitige Alterung verhindert.

Mit der Laservorbehandlung des Al-Ableiters wird die Alterungsbeständigkeit der Siegelverbindung ebenfalls deutlich verbessert. Nach der Alterung sind keine optischen Veränderungen oder Schädigungen zu erkennen. Bei der Prüfung der Siegelnahtfestigkeit mittels Schälprüfung tritt zunächst ebenfalls ein kohäsives Versagen zwischen dem Siegelband und der laserbehandelter Oberfläche auf, welches nach wenigen Millimetern zu einem Versagen des Siegelbandes führt. Die hervorragende Alterungsbeständigkeit ist wieder auf die verbesserte Aluminiumoxidschicht zurückzuführen. Gleichzeitig kann das PP durch die vergrößerte Oberfläche besser an den Al-Ableiter anbinden. Durch die poröse Oxidschicht wird ein Eindringen des PP in die Deckschicht begünstigt. Dies führt zu einer weiteren Vergrößerung der nutzbaren Kontaktoberfläche und verbessert zusätzlich die Anbindung.

Die Auswertung der Alterung und Prüfung zeigt, dass die Laservorbehandlung die Haftung des Siegelbandes im Bereich der Al-Ableiter gegenüber der ZrF-Behandlung deutlich verbessert und die Festigkeiten mit den Ergebnissen der Chromatierung vergleichbar sind. Die Laservorbehandlung stellt somit eine praktikable Lösung zur Verbesserung der Haftfestigkeit im Bereich der Kontaktfahnen dar, wie sie ansonsten nur durch Chromatierung der Ableiterbleche zu erreichen ist. Im Unterschied zur Chromatierung ist die Laservorbehandlung eine umweltfreundliche und trockene Methode, welche eine Integration in die Prozesslinie ermöglicht.

In den weiterführenden Versuchen konnte gezeigt werden, dass die Laservorbehandlung auch für die Verbesserung der Festigkeit und Alterungsbeständigkeit beim direkten Siegeln der Verbundfolie auf die vorbehandelte Oberfläche geeignet ist. Mit allen anderen getesteten Methoden war dies nicht möglich, da durch die verschlechterte Anbindung zwischen Bauteiloberfläche und Verbundfolie (PP-Schicht) eine beschleunigte Unterwanderung der Fügezone durch den Elektrolyten und damit eine irreparable Schädigung erfolgte. Die verbesserte Beständigkeit der laservorbehandelten Oberfläche beruht auf der Vergrößerung der Oberfläche durch Aufrauung und der verstärkten Oxidschichtbildung. Beide Effekte führen zu einer Verschiebung des Metall/Polymer-Übergangs in Richtung Oxidschicht, wodurch der für Alterungseinflüsse anfälligere scharfe Übergang vermieden wird.

5.6 Herstellung stoffschlüssiger Übergangskontakte aus Al-Cu durch Laser-Induktions-Walzplattieren

Im Hinblick auf die Verkürzung der Prozesszeit zum Verschalten von Lithium-Ionen-Zellen und die Sicherung langzeitstabiler leitfähiger Verbindungen war die Verfahrensentwicklung zum Verbinden von Cu mit Al ein wesentlicher Forschungsschwerpunkt. Als innovativer Ansatz wurde die Herstellung von Al-Cu-Zellverbindern durch Laser-Induktions-Walzplattieren verfolgt.

Technologisch ist das Laser-Induktions-Walzplattieren zwischen dem Kalt- und dem Warmwalzplattieren einzuordnen. Mittels Induktion werden die zu fügenden Bänder aus unterschiedlichen Werkstoffen (Al- bzw. Cu-Band) unmittelbar vor dem Walzspalt vorgewärmt. Mit einem zum Linienfokus geformten Laserstrahl erfolgt lokal begrenzt direkt im Walzspalt die Kurzzeiterwärmung der Bandoberflächen auf Temperaturen nahe der Schmelztemperatur. Bei Walzgeschwindigkeiten von etwa 7,5 m/min werden die beiden Bänder anschließend großflächig, d. h. über die gesamte Bandbreite, stoffschlüssig verbunden.

Im Rahmen dieses Projektes stand die Teilaufgabe, aufbauend auf den bisherigen Ergebnissen aus der Verfahrensentwicklung zum induktiv unterstützten Laserwalzplattieren auch Plattierungen zwischen Kupfer- und Aluminiumbändern zu realisieren. Das so entstehende Bimetallband soll als Halbzeug für die Fertigung von Zellverbindern dienen. Neben der Ermittlung geeigneter Plattierparameter war die Auslegung einer industrietauglichen Laser-Induktions-Walzplattieranlage Inhalt der Aufgabenstellung. Zum Schluss der Projektlaufzeit sollten die an der bisherigen Laboranlage ermittelten Plattierparameter auf die neue Anlage übertragen werden.

Verfahrensentwicklung zur Herstellung von Cu/Al-Bimetallbändern
Bei den Versuchen auf der alten Laboranlage wurden sowohl 12 als auch 22 mm breiten Plattierungen hergestellt. Die Bandbreiten der auf der neuen Anlage eingesetzten Bänder lagen bei 20 mm. Aus Gründen der Materialverfügbarkeit von geeignetem 12 mm breitem Al-Band wurden 6 m lange Stäbe aus der Al- Legierung 6061 verwendet. Nach Umbau der Anlage auf die verarbeitbare Bandbreite von 22 mm konnte Al-Band der Qualität 99,9 eingesetzt werden. In den Abbildungen 5.6.1 und 5.6.2 sind typische Querschliffe der 12 bzw. 22 mm breiten Plattierungen abgebildet.

Bei der ursprünglichen Anlagenkonfiguration wurden sowohl das Cu-Band als auch die Al-Stäbe über entsprechend in die Walzenoberfläche eingebrachte Nuten (Tiefe ca. ½ Banddicke) sicher geführt. Auf der Höhe der Fügezone entstand durch die Verformung im Walzspalt eine Wulst. Die 22 mm breiten Plattierungen wurden mit glatten Walzen hergestellt, wobei die seitliche Führung durch kleine, seitlich des Walzspaltes angeordnete Rollen erfolgte. Da deren Kraftaufnahme begrenzt war, stellte sich während der Versuche durch die im Walzspalt wirkenden Scherkräfte ein seitlicher Versatz zwischen den beiden Plattierpartnern ein (**Bild 73**).

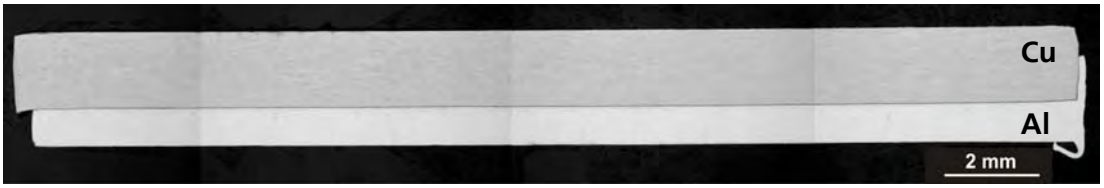


Bild 73: **Querschliff einer Plattierung, hergestellt auf alter Laboranlage, Zustand poliert, P_L= 10 kW, v_W= 7,5 m/min**

Bild 74 zeigt Querschliffe zweier mit der neuen Laserinduktionswalzplattieranlage (siehe Abschnitt 5.8) hergestellten Plattierungen. Durch die Türkenkopf-Anordnung der 4 Walzen lässt sich ein seitlicher Versatz zwischen oberen und unteren Band vermeiden.

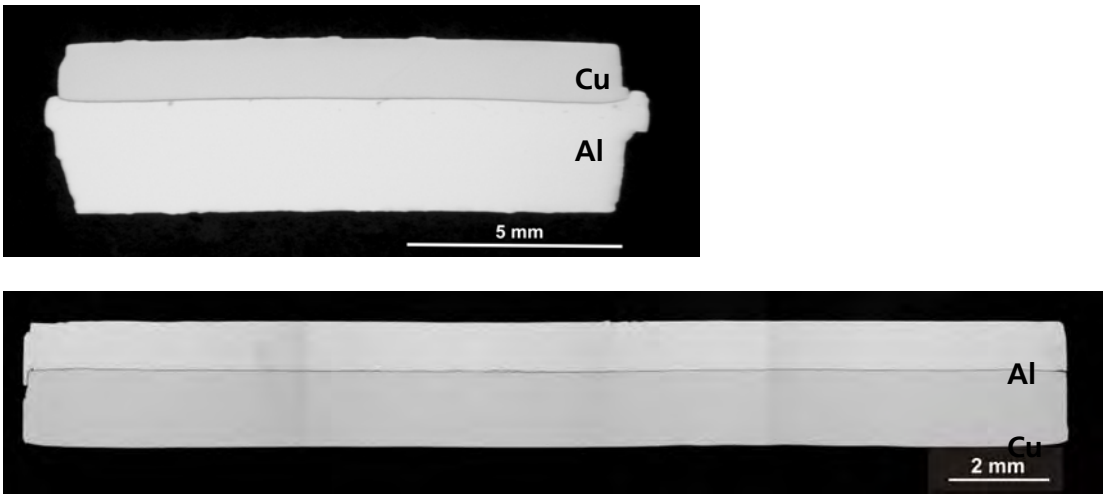


Bild 74: **Querschliffe zweier Plattierung, hergestellt auf neuer Laboranlage, Zustand poliert, oben: P_L= 5 kW, v_W= 1,8 m/min; unten: P_L= 11 kW, v_W= 10 m/min**

Die ursprüngliche Anlagenkonfiguration für die Verarbeitung der 12 mm breiten Bänder bestand aus zwei HF-Generatoren mit jeweils 25 kW Leistung zum Vorwärmen der Bänder und einem 5 kW fasergekoppelter Diodenlaser (Leihgerät) mit einem 13 mm breiten Linienfokus. Zum Plattieren der 22 mm breiten Bänder wurde ein 10 kW Diodenlaser (ebenfalls Leihgerät) mit einer 23 mm breiten Linie genutzt.

Weiterhin erfolgte noch die Einbindung zweier zusätzlicher 30 KW-HF-Generatoren zum besseren Vorwärmen des Cu-Bandes. Für die Walzplattierversuche an der neuen Anlage standen zwei Scheibenlaser mit 5 kW und 8 kW (Leihgerät) und für die Bandvorwärmungen zwei HF-Generatoren mit 50 kW bzw. 100 kW zur Verfügung. In **Tabelle 9** sind die für die Verfahrensentwicklung genutzten unterschiedlichen Anlagenkonfigurationen zusammengefasst:

Tabelle 9: **Zusammenfassung der wichtigsten Leistungskriterien der genutzten Walzplattieranlagen**

	Alte Laboranlage 12 mm Bandbreite	**Alte Laboranlage 22 mm Bandbreite**	**Neue Anlage 20 mm Bandbreite**
Generatorleistung P_G	2 x 25 kW	2 x 25 kW oder 1 x 25 kW + 1 x 55 kW	50 kW + 100 kW
Laserleistung P_L	5 kW	10 kW	5 kW + 8 kW
Laserlinie	0,8 x 13 mm²	1,6 x 23 mm²	0,2 x 20 mm² und 0,4 x 20 mm²
Brennweite f	200 mm	200 mm	400 mm
Walzplattiergeschwindigkeit (genutzt) v_W	1,5 – 3,0 m/min	7,5 – 9,0 m/min	5,0 – 11,0 m/min
Banddicken d	1,5 mm Cu 3,0 mm Al	1,6 mm Cu 1,0 mm Al	1,5 mm Cu 1,0 mm Al

Charakterisierung der Plattierungen

Prinzipiell wird bei einem „Warmwalzplattierprozess“ von Aluminium und Kupfer die Bildung von intermetallischen Phasen am Werkstoffübergang erwartet. Die ersten Versuchsergebnisse belegten auch diese Erwartungen. **Bild 75** zeigt den Querschliff einer 12 mm breiten Plattierung, deren Fügezone durch einen teilweise sehr breiten Saum aus

unterschiedlichen intermetallischen Al-Cu-Phasen gekennzeichnet ist.

Die Phase Al_2Cu kann sicher identifiziert werden. Eine solche Plattierung lässt sich durch die versprödende Wirkung der intermetallischen Phasen sehr leicht trennen („Abschälen"). Vor allem die Al-reichen Phasen sind mechanisch nur gering belastbar und durch die sich ausbildenden, teilweise sehr dicken Phasensäume auch in Hinsicht Übergangswiderstand nicht optimal ausgelegt.

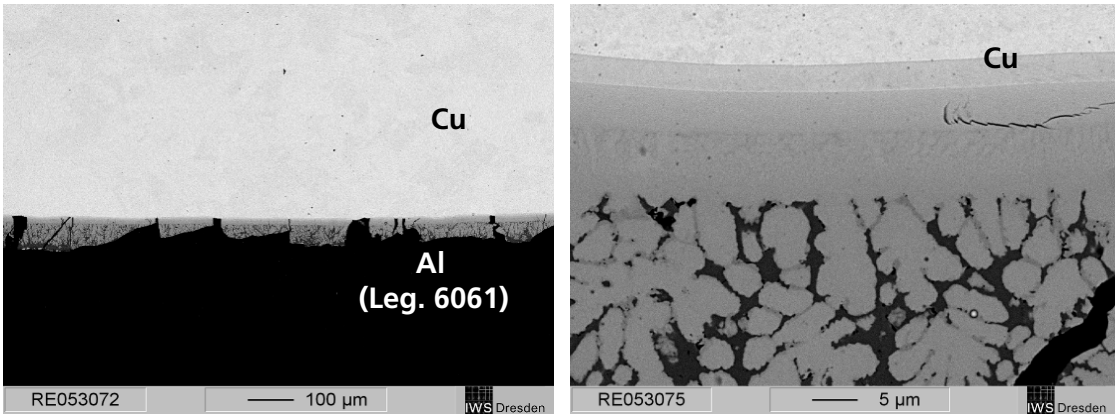


Bild 75: **REM-Aufnahmen der Fügezone einer Plattierung mit stark ausgebildetem intermetallischem Phasensaum am Werkstoffübergang Cu/Al, Rückstreumodus, links: Übersichtsaufnahme, rechts: Ausschnitt der Fügezone mit unterschiedlichen intermetallischen Cu/Al-Phasen**

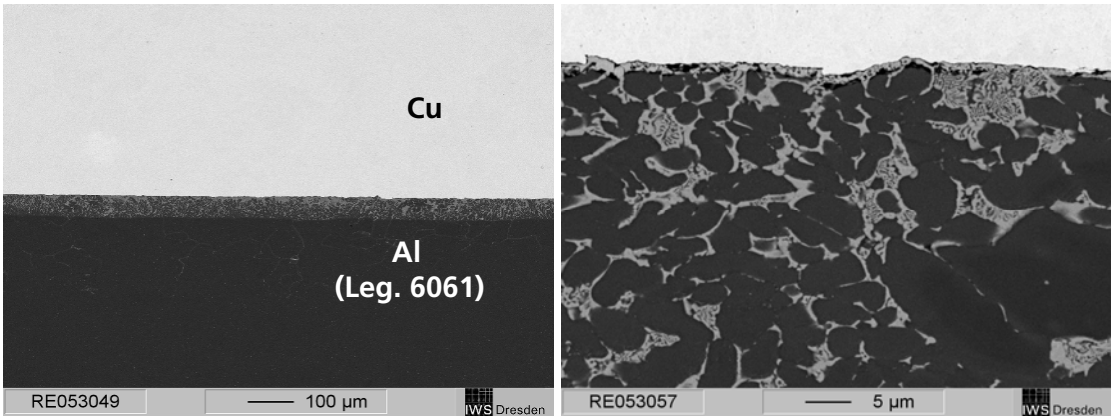


Bild 76: **REM-Aufnahmen der Fügezone einer Plattierung (alte Anlage) mit Legierungsbildung am Werkstoffübergang Cu/Al, Rückstreumodus, links: Übersichtsaufnahme, rechts: Ausschnitt der Fügezone mit Al-Mischkristall (dunkel) und Al-/Al_2Cu-Eutektikum (hell)**

Etwas besser zeigt sich die Gefügeausbildung der in **Bild 76** dargestellten, ebenfalls 12 mm breiten Plattierung. Auch hier ist eine Phasenbildung der Al-reichen Al_2Cu-Phase zu beobachten. Diese scheidet sich aber vorwiegend in einem schmalen Legierungsbereich auf der Al-Seite eutektisch um die primären, dendritisch ausgeschiedenen Mischkristalle aus. Am unmittelbaren Werkstoffübergang bildet dieses Eutektikum ebenfalls
eine Art Saum. Die verhältnismäßig dicken Ausgangshalbzeuge (Cu-Band 12 x 1,5 mm^2, Al-Stab 12 x 2,0 mm^2) ließen bei den verfügbaren Leistungen nur Plattierungen mit verhältnismäßig langsamen Plattiergeschwindigkeiten zwischen 2,5 und 1,8 m/min zu.

Eine deutliche Verbesserung wurde bei Nutzung der 22 mm breiten Anlagenkonfiguration mit den hierbei verfügbaren größeren Leistungen von Laser und Induktion und gleichzeitig etwas geringerer Ausgangsdicke der eingesetzten Bänder möglich. Bei Vorschubgeschwindigkeiten von 7,5 bis 8 m/min konnten sehr fest haftende Plattierungen erzeugt werden.

Die REM-Aufnahme des Querschliffs einer solchen Fügezone ist in **Bild 77** abgebildet. Sie zeigt die Al_2Cu-Phase in vereinzelten eutektischen Nestern, die sich auf der Al-Seite ausgebildet haben, während die Fügezone fast frei von einer Phasenbildung bleibt. Hieraus erklärt sich auch die vergleichsweise hohe Festigkeit dieser Plattierungen, deren gemessene Scherfestigkeiten bei 30 - 40 MPa liegen, wobei die Scherflächen im Aluminium verlaufen. Der fehlende Saum der intermetallischen Phasen wirkt sich auch positiv auf den Übergangswiderstand aus (näherungsweise < 30 $\mu\Omega*mm^2$).

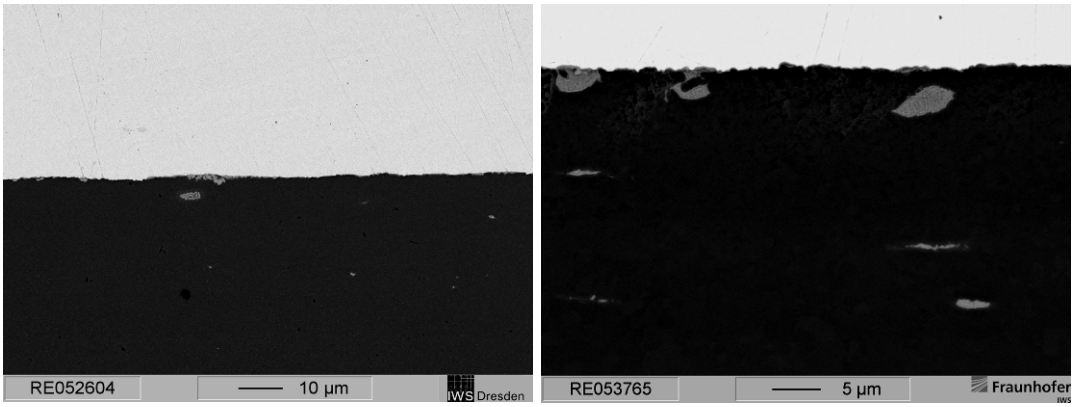


Bild 77: **REM-Aufnahmen der Fügezone einer Plattierung (alte Anlage) ohne intermetallische Phasen am Werkstoffübergang Cu/Al, Rückstreumodus, links: Übersichtsaufnahme, rechts: Ausschnitt der Fügezone mit Al-Mischkristall (dunkel) und einzelnen eutektischen Zellen (Al-/Al_2Cu-Eutektikum-hell)**

Im Zuge der Inbetriebnahme der neuen Anlage ergab sich die Aufgabe, diese sehr guten Ansätze für die Realisierung von Plattierungen auf die neue Laserwalzplattieranlage zu übertragen. Neben der Nutzung des Türkenkopf-Prinzips zum Walzplattieren führen vor allem die beiden Scheibenlaser mit ihren wesentlich schlankeren Laserlinien von 0,2 bzw. 0,4 mm Dicke (gegenüber 1,6 mm beim 10 kW Diodenlaser) zu einem neuen Zusammenspiel der Verfahrensparameter für die Realisierung geeigneter Plattierungen.

Das unterschiedliche Verformungsverhalten der beiden zu fügenden Werkstoffe Aluminium und Kupfer führt schon im kalten Zustand zu sogenannten „Rattermarken" an den Bandoberseiten, die durch leichte, aber in geringem Abstand gleichmäßig verteilte Welligkeiten verursacht werden. Bei Plattierungen können sie auch in der Fügezone sichtbar werden und wirken sich auf die lokale Festigkeit der Fügezonen aus. Durch eine geeignete Parameterwahl kann dieser Effekt weitgehend eliminiert werden. Bis zum Ende der Projektlaufzeit erfolgten Plattierversuche sowohl nur mit dem 8 kW-Laser als auch mit beiden Scheibenlasern (gesamt 13 kW). Die dabei realisierten Plattiergeschwindigkeiten lagen zwischen 5 m/min (8 kW-Laserleistung) und 11 m/min (13 kW-Laserleistung).

Die gleichzeitige Nutzung von zwei Lasern erlaubt eine definierte separate Erwärmung der Bänder vor dem Spalt. Die dafür notwendige leicht schräge Anordnung der Laserköpfe bewirkt aber zusammen mit einem Walzendurchmesser von 240 mm, dass bei einem Fokus von 400 mm die Laserlinien nicht vollständig bis in den Walzspalt gelangen. Für weitere effektivere Versuche mit beiden Lasern ist die Nutzung längerer Brennweiten (z. B. 800 mm) notwendig.

Fazit

Im Hinblick auf die Verkürzung der Prozesszeit zum Verschalten von Lithium-Ionen-Zellen und die Sicherung langzeitstabiler leitfähiger Verbindungen war die Verfahrensentwicklung zum Verbinden von Cu mit Al ein wesentlicher Forschungsschwerpunkt. Als innovativer Ansatz wurde die Herstellung von Al-Cu-Zellverbindern durch Laser-Induktions-Walzplattieren verfolgt.

Das Laser-Induktions-Walzplattieren zeigt großes Anwendungspotenzial zur Herstellung von Al-Cu-Zellverbindern aber auch zum Verbinden anderer schwer schweißbarer Werkstoffe (z. B. Al-Ti, Al-Ni, Ag-$AgSnO_2$, höherfeste Stähle u.a.). Gegenüber dem Kaltwalzen zeichnet sich das Verfahren durch viel geringere Umformgrade aus (ca. 10 - 15 % gegenüber 30 - 70 %). Dadurch sind Werkstoffe mit geringer Duktilität und Werkstoffpaarungen mit größeren Unterschieden in der Fließspannung ebenso plattierbar wie Schmalbänder, Profile und transition joints. Im Vergleich zum Warmwalzplattieren sind kleinere Walzwerke und dünnere Plattierauflagen möglich. Die Tendenz zur Bildung intermetallischer Phasensäume ist besser unterdrückbar, was ein breiteres Werkstoffspektrum ermöglicht.

Auf einer ursprünglich für die Verarbeitung von 12 mm breiten Bändern ausgelegten Laboranlage zum induktiv unterstützten Laserwalzplattierverfahren konnten nach Umbau bis zu 22 mm breite Plattierungen mit 2,4 mm Dicke bei Umformgraden von etwa 10 % realisiert werden. Ließen sich die Plattierungen in der Anfangskonfiguration noch „Abschälen“, liegen die ermittelten Scherfestigkeiten an den gegenwärtig realisierbaren Plattierungen bei 30 - 40 MPa.

Die analytischen Untersuchungen der Fügezonen zeigten, dass sich die Ausbildung der Fügezone, insbesondere hinsichtlich der Ausbildung von intermetallischen Phasen, durch die Wahl der Prozessparameter in weiten Bereichen beeinflussen lässt. Für eine gute mechanische Festigkeit und einen geringen Übergangswiderstand ist eine Fügezone ohne intermetallische Phasen von Vorteil. Das Laser-Induktions-Walzplattieren ist derzeit das einzige Fügeverfahren, mit dem Al und Cu ohne Ausbildung spröder intermetallischer Phasensäume stoffschlüssig und mit hoher Effizienz gefügt werden können.

5.7 Konzeption und Aufbau einer Anlage zur Herstellung stoffschlüssiger Übergangskontakte

Nach Vorliegen der Ergebnisse aus den ersten Cu/Al-Plattierversuchen erfolgte die Konzeption der neuen, variableren und industrietauglichen Laserwalzplattieranlage. Die reine Walzplattieranlage wurde über eine Ausschreibung an die Firma Karl-Fuhr GmbH & Co. KG vergeben. Für die Vorwärmung der Bänder waren zwei HF-Generatoren vorgesehen. Den Zuschlag erhielt die Firma eldec Schwenk Induction GmbH. Die Integration von zwei Lasern in die Walzplattieranlage lag im Aufgabenbereich des IWS und wurde gemeinsam mit der Firma Trumpf Lasertechnik GmbH realisiert. Konzeption, Entwicklung, Aufbau und Inbetriebnahme der Anlage erfolgte in weniger als 11 Monaten.

Grundaufbau der Laser-Induktions-Walzplattieranlage (LIWP)
Das Grundprinzip des Laser-Induktions-Walzplattierens ähnelt prinzipiell einem Warmwalzplattierverfahren. Der wesentliche Unterschied ergibt sich aus einem über dem Bandquerschnitt gradierten Temperaturverlauf und dem Einsatz sehr schmaler Bänder. Werden beim konventionellen Warmwalzplattieren nur gleichmäßig durchgewärmte Bänder plattiert, so erreichen beim Laser-Induktions-Walzplattieren nur die zu fügenden Innenflächen der Bänder die notwendigen Plattiertemperaturen. Dadurch können die Spitzentemperaturen durchaus höher ausfallen, während die Gesamtdurchwärmung sich auf Werte unterhalb der Warmumformtemperaturen einstellt. Die Verarbeitung von Schmalband mittels Warmwalzplattieren ist bisher nur bei Sonderanwendungen bekannt geworden (z. T. für die Herstellung von Kontaktwerkstoffen). Für die Verbindung von Cu mit Al kann das konventionelle Warmwalzplattieren wegen der Bildung spröder intermetallischer Phasensäume jedoch nicht eingesetzt werden.

In **Bild 78** ist der Grundaufbau der Anlage in einer 3D-Darstellung wiedergegeben. Die neue Anlage ist prinzipiell auf die Verarbeitung von Bändern mit Breiten bis zu 150 mm und Dicken bis 4 mm ausgelegt. Das maximale aufnehmbare Gewicht der Coils aus plattiertem Band liegt bei 1 t.



Bild 78: **Grundaufbau Laser-Induktions-Walzplattieranlage, 1+2 Abzughaspeln, 3+4 Richtwerke, 5+6 Umlenkrollen mit Tänzer, 7 Bereich Laserköpfe und Vorwärminduktoren, 8 Türkenkopfwalzwerk zum Plattieren, 9 Tänzer, 10 Türkenkopfwalzwerk zum Kalibrieren, 11 Aufwickelhaspel,**

Besonderes Augenmerk muss bei der Verarbeitung von schmalen und zugleich verhältnismäßig dünnen Bändern auf die Bandspannung bzw. den geeigneten Bandzug gelegt werden, wobei durch die lokale Erwärmung der Bänder im Bereich des Walzspaltes der aufzubringende Bandzug begrenzt wird. Geregelt wird der Bandzug über die Tänzer. Die Herausforderung der neuen Anlage bestand vor allem in einem über die gesamte Plattierzeit sicheren Handling der schmalen und warmen Bänder.

Bild 79 zeigt Fotos der am IWS aufgestellten Anlage. Ihre Gesamtlänge beträgt 18,5 m. Die Hauptkomponenten der reinen Walzplattier-Anlage sind (in Bandlaufrichtung): Abzughaspeln zum Abspulen der Ausgangsbänder, angetriebene Richtapparate, angetriebene Bürsten mit Nass-Saug-System, Türkenkopfwalzgerüst zum Plattieren, Maschinenständer, Türkenkopfwalzgerüst zum Kalibrieren, Aufwickelhaspel zum Aufspulen. Für die Steuerung des Bandzuge befinden sich vor den beiden Walzgerüsten und vor der Aufwickelhaspel sogenannte Tänzer. Unmittelbar vor dem Türkenkopfgerüst sind die Vorwärminduktoren (angeflanscht an den Außenschwingkreisen der HF-Induktoren) und die verstellbaren Laseroptiken positioniert. Letztere sind durch Lichtleitkabel mit den Scheibenlasern verbunden. Der Bereich vor dem Plattiergerüst wird durch eine Laserschutzhaube gesichert. Komplettiert wurde die Anlage mit einer angepassten Schutzgasschirmung der warmen Bandabschnitte und des Walzspaltes, einer Gaskühlung für das plattierte Band, zwei Pyrometer für die Messung der Bandvorwärmtemperaturen und mehreren Kameras für die Prozessbeobachtung. Die gesamte Anlage ist NC-gesteuert.



1 + 2 Abzughaspeln,
3 Einhausung zum Laserschutz,
4 Türkenkopfwalzwerk zum Plattieren,
5 Bedienpanel,
6 plattiertes Band,
7 Türkenkopfwalzwerk zum Kalibrieren,
8 Tänzer,
9 Aufwickelhaspel

Bild 79: **Ansichten (aus Richtung Bandauslauf) Laser-Induktions-Walzplattieranlage**

Nachfolgend sollen die wichtigsten Baugruppen näher beschrieben werden.

Abzughaspeln, Richtapparate, Reinigungsbürsten
Bild 80 zeigt die beiden hintereinander angeordneten Abzughaspeln incl. der oberen Richtmaschine. Sie besitzen seitliche Begrenzungsarme zum Stützen der Coils und je einen pneumatisch betriebenen Andrückarm zum Halten des Coilbandes beim Lösen der Coilsicherungsbänder. Die Haspeln besitzen einen Hilfsantrieb zum Lösen und Zurückziehen des Bandes und können jeweils bis 1 t Coilgewicht aufnehmen. Die angetriebenen Richtmaschinen sorgen im Zusammenspiel mit dem ersten Tänzer für eine voreingestellte Bandspannung vor dem Plattierwalzwerk. Das Reinigen der Bänder erfolgt über rotierende Bürsten, die sowohl im Gleichlauf als auch im Gegenlauf betrieben werden können und mit einem Nass-Saug-System verbunden sind (siehe **Bild 81** mit unterer Richtmaschine).



Bild 80: **Anlagenansicht Abzuhaspeln (1,2) und Bandrichtwerke (3,4)**



Bild 81: **Ansicht untere Abzughaspel (1), Richtapparat (2) und Bürsteinheiten (3,4) mit Nass-Sauger-System (5)**

Bandeinlauf mit Tänzersteuerung, induktiver Vorwärmung, Bandführung mit Schutzgasschirmung, Laserbearbeitungsoptik und Laserschutzhaube

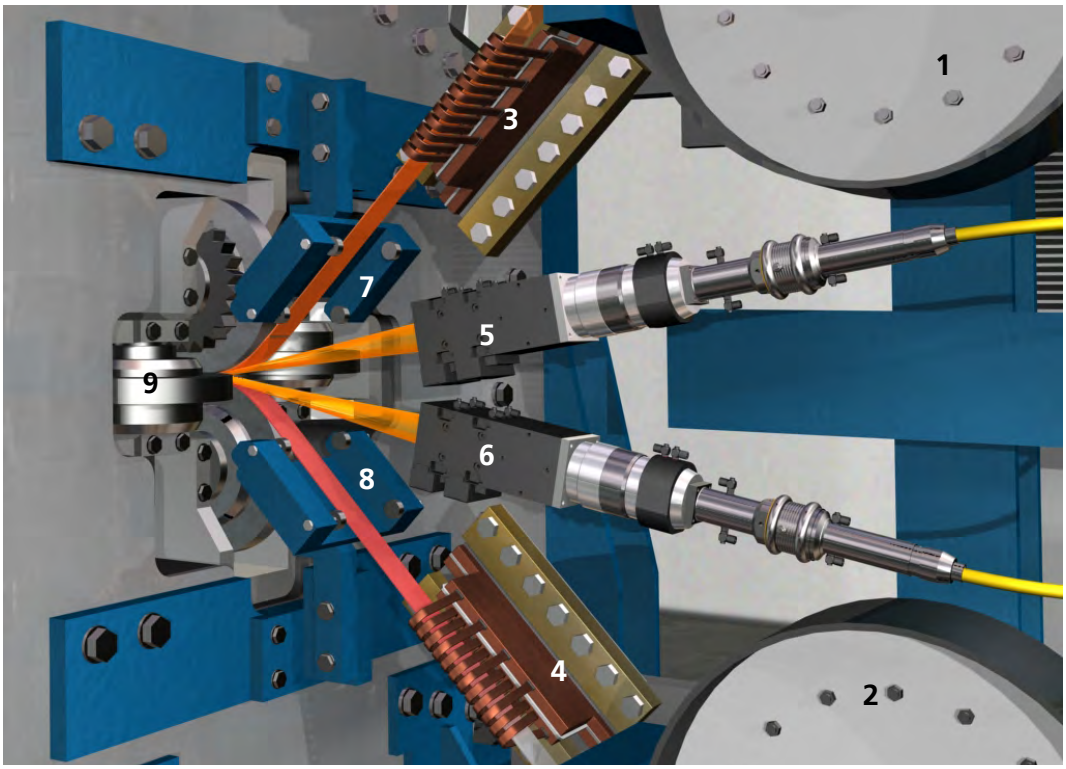


Bild 82: **3D-Darstellung des Bereiches vor dem 1. Walzgerüst mit Umlenkrollen (1,2), Vorwärminduktoren (3,4), Laseroptiken (5,6), Bandführungen (7,8) und Walzgerüst (9)**

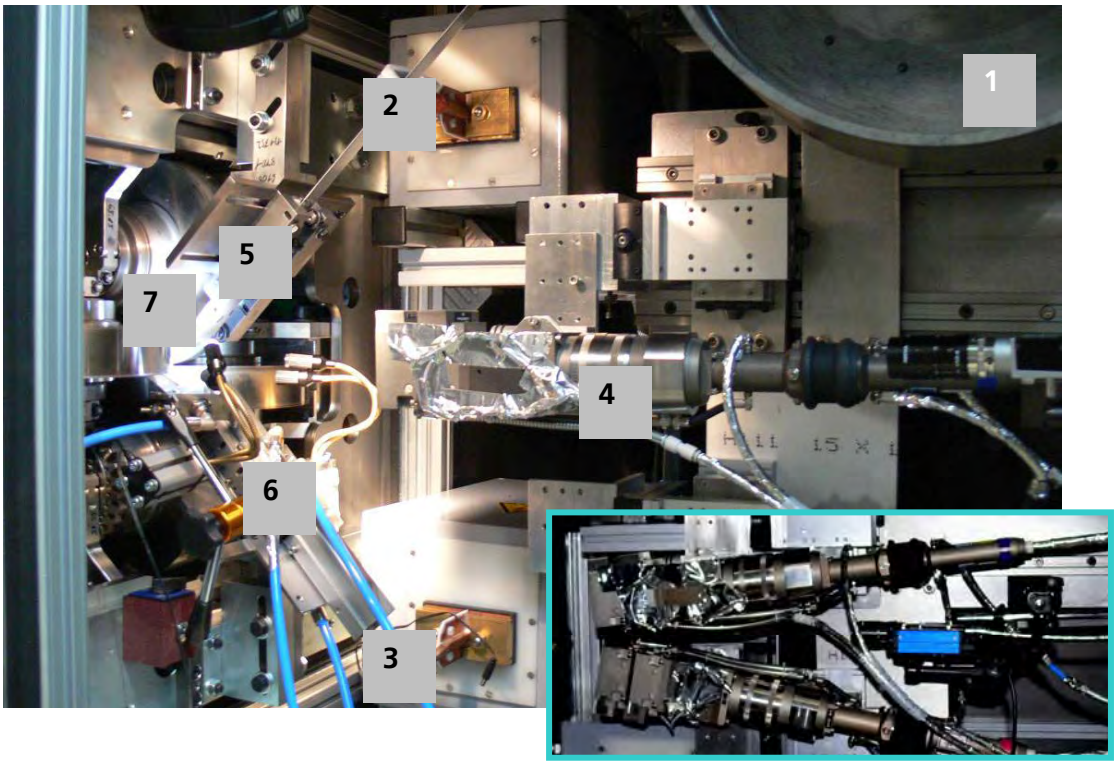


Bild 83: **Ansicht des Bereiches vor dem 1. Walzgerüst mit Umlenkrollen (1), Vorwärminduktoren (2,3), Laseroptik (4), Bandführungen (5,6) und Walzgerüst (7), Anordnung mit einer Laseroptik, kleines Bild: Anordnung mit zwei Laseroptiken**

Die in **Bild 82** wiedergegebene graphische Darstellung veranschaulicht die Anordnungen der einzelnen Komponenten im Bereich vor dem Walzspalt, den realen Aufbau zeigen die Aufnahmen aus **Bild 83**.

Vor dem Einlauf des Bandes in den Walzapparat werden die beiden Bänder um 45° nach unten bzw. oben in Richtung Walzspalt umgelegt. Die Umlenkrollen sind mit in den Tänzer integriert, der den Bandzug vor dem Walzspalt regelt (siehe **Bild 84 links**.). Im Tänzer wird ein definierter Banddurchhang lagegeregelt überwacht. Die Tänzerposition signalisiert den angetriebenen Bandrichtwerken, ob mehr oder weniger Band benötigt wird, um den voreingestellten Bandzug (über Gewichte an der mittleren Tänzerrolle) zu halten. Danach durchlaufen die Bänder die Vorwärminduktoren.

Ab hier werden die erwärmten Bänder vor Oxidation mittels Schutzgasabdeckung geschützt (siehe **Bild 84 rechts**). Für einen sicheren Einlauf in den Walzspalt werden die Bänder durch eine auf die Bandgeometrie ausgelegte Gleitführung geleitet, in der Keramikleisten ein Abkühlen der erwärmten Bänder minimieren sollen. Unmittelbar vor dem Walzspalt treffen die zur Linie geformten Laserstrahlen auf die zu verbindenden Bandinnenflächen.

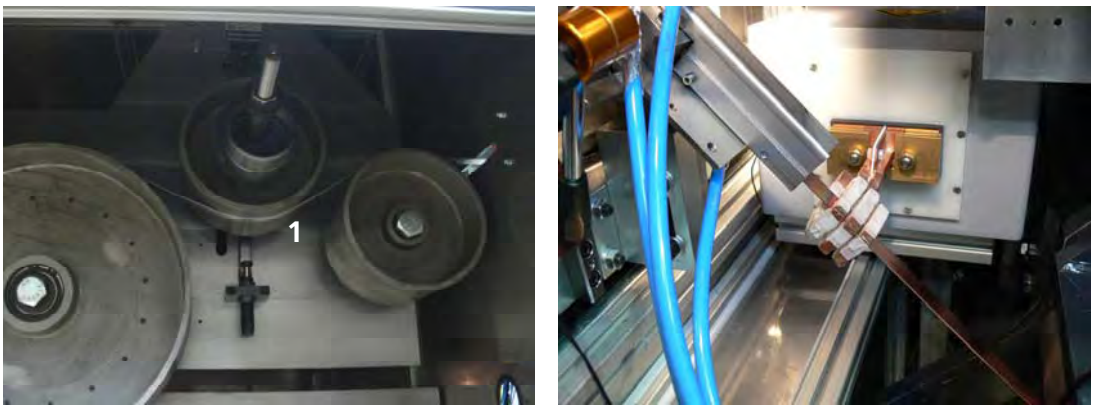


Bild 84: **Ansichten der Laser-Induktions-Walzplattieranlage: links: obere Umlenkrolle mit integrierter Tänzersteuerung (1), rechts: Schutzgasabdeckung unteres Band**

Türkenkopfwalzgerüst zum Plattieren

Das von der Firma Karl Fuhr GmbH patentierte Prinzip des flexiblen Türkenkopfes wird in der in **Bild 85 links** gezeigten Anordnung der 4 Walzen deutlich erkennbar. Die versetzte Anordnung der Walzen lässt in einem bestimmten Bereich eine variabel einstellbare Bandkontur zu. Die sichtbare Spalteinstellung beträgt 2,3 mm x 20,5 mm. (Hinweis: Die Verschleißmarken auf oberer- und unterer Walze entsprechen nicht dem eingestellten Bandlauf.)

Bild 85 rechts zeigt die Position der 4 Walzen bei eingeführtem Band. Alle 4 Walzen werden über NC-gesteuerte Zustellachsen positioniert Obere- und untere Walzen sind wassergekühlt und werden über Kardanwellen angetrieben. Werden die seitlichen Walzen herausgefahren, so lässt sich das Walzgerüst auch als Duo-Walzwerk betreiben.

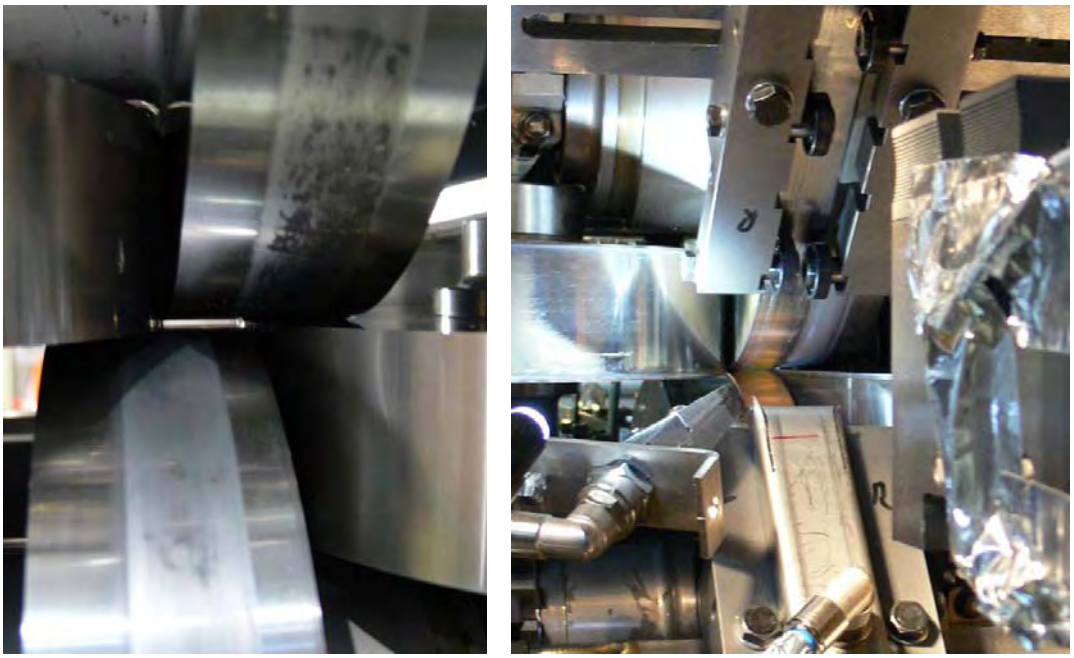


Bild 85: **Anordnung der Walzen bei Betriebsart flexibler Türkenkopf; links: Spaltbildung mit seitlichem Nullspalt (ohne Band), rechts: Betriebszustand mit eingeführten Bändern.**

Bandauslauf mit Gaskühlstrecke, Kalibrierwalzwerk mit Tänzersteuerung und Aufwickelhaspel mit Tänzersteuerung

Unmittelbar hinter dem Walzspalt wurde eine modular aufgebaute flexible Gaskühlstrecke installiert. Diese besteht aus 10 einstellbaren speziellen Gasdüsen, die einen lamellaren Gasstrahl erzeugen. Der aus dem Walzgerüst herausragende Teil der Kühlstrecke ist in **Bild 86** wieder gegeben.

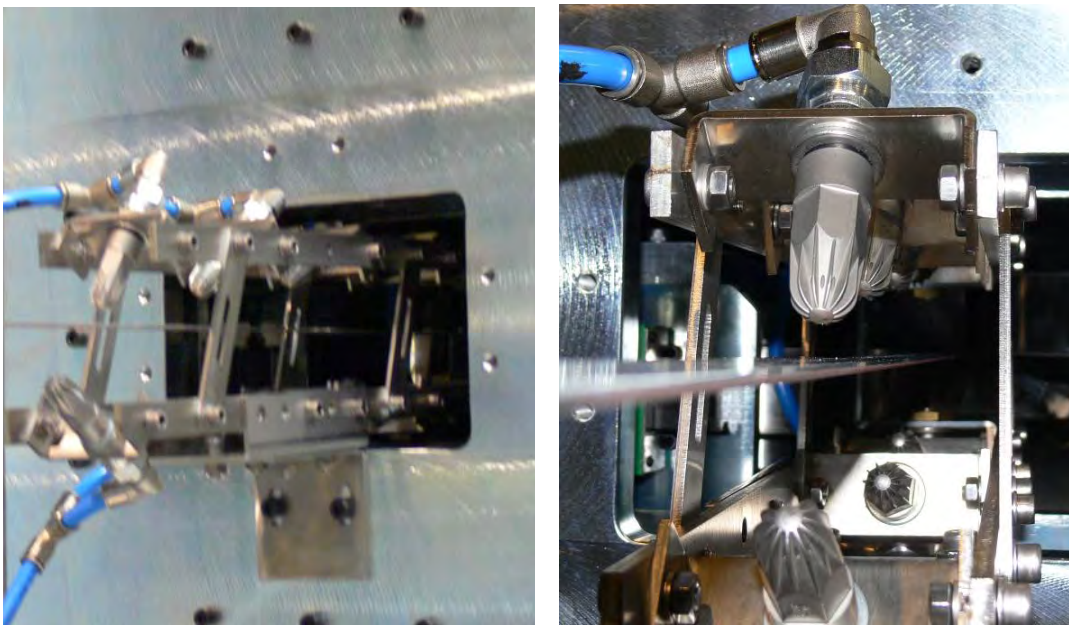


Bild 86: **Modular aufgebaute Gaskühlstrecke,**
links: aus dem Walzgerüst herausragender Teil, rechts: Ansicht in Bandlaufrichtung

Die Düsen sind schwenkbar befestigt. Insgesamt kann über dieses System ein großes Gasvolumen (Stickstoff und/oder Druckluft) für die Kühlung des plattierten Bandes bereit gestellt werden. Diese Kühlstrecke ist bei Bedarf in ihrer Länge leicht erweiterbar. Diese Kühlung sollte insbesondere bei Werkstoffkombinationen von Vorteil sein, die zur Bildung intermetallischer spröder Phasen neigen. Durch die Kühlung wird dieser bei hohen Temperaturen zwangsläufig angeschobene Prozess schneller gestoppt. Die Bandkühlung wirkt sich aber auch günstig auf das Aufwickeln des plattierten Bandes aus.

Hinter der Kühlstrecke wurde entsprechender Platz für eine optionale Wärmebehandlungsstrecke vorgesehen (bei der vorliegenden Paarung Al/Cu ist eine Wärmebehandlung nicht relevant). Danach durchläuft das Band den in **Bild 87 (links und kleines Bild)** dargestellten Tänzer zur Steuerung des Bandzuges im nachfolgenden Kalibriergerüst. Dieses ist ebenfalls als flexibler Türkenkopf ausgelegt und entsprechend baugleich mit dem ersten Walzgerüst (incl. Walzenkühlung). Beide Walzgerüste stehen auf einem gemeinsamen Maschinenständer, wodurch das Kalibriergerüst prinzipiell auch näher am Plattiergerüst montiert werden kann.



Bild 87: **Kalibriergerüst (links) mit Tänzersteuerung (kleines Bild) und Aufwickelhaspel mit Tänzersteuerung (rechts)**

Auch die Aufwickelhaspel **Bild 87 rechts** ist mit einer Tänzersteuerung kombiniert, so dass über dem gesamten Bandlauf der Anlage die Bandspannung geregelt werden kann. Die Tänzer sind darüber hinaus mit dem Notaus-Kreis der Steuerung verbunden, der bei einem evtl. Bandabriss ausgelöst wird. Auch die Aufwickelhaspel ist mit einem pneumatisch betriebenen Andrückarm ausgerüstet (für Bandwechsel) und kann durch ein separates Bedienpanel manuell betrieben werden.

NC-Steuerung und Prozessüberwachung

Die Anlage ist mit einer umfangreichen NC-Steuerung ausgerüstet, deren Bedienpanel in **Bild 88** zu sehen ist. Dieses ist am Maschinenständer über eine Schiene befestigt und kann über die Länge des Maschinenständers bewegt werden (notwendig für Einrichtvorgänge an beiden Gerüsten). An diesem Panel wurde ein weiterer Bildschirm für die Steuerung und Darstellung der Prozessüberwachung angebracht.



Bild 88: **Panel der Maschinensteuerung und Zusatzbildschirm für die Prozessüberwachung**

Für die Prozessüberwachung stehen 5 Kameras zur Laserjustage und zur Beobachtung von Prozess und Bandlauf sowie 2 Pyrometer für Ermittlung der Vorwärmtemperaturen zur Verfügung. Deren Daten werden auf dem Zusatzbildschirm dem Anlagenbediener angezeigt. Die Anlage wurde nach ihrer Fertigstellung und Inbetriebnahme mit einem System aus maßgeschneiderten Sicherheitszaun und Lichtschranken arbeitsschutzgerecht komplettiert.

Fazit

Im Rahmen des Projektes wurde die erste Laser-Induktions-Walzplattieranlage konzipiert, gefertigt und erprobt, mit der sowohl Bänder als auch Profile plattierbar sind. Die Anlage besteht aus zwei Bandabhaspeln, einem angetriebenen Bandrichtwerk mit Bandreinigung, mehreren Bandumlenkrollen und einer Konsole für die Aufnahme von zwei Induktoren und zwei Laseroptiken. Es folgt ein Türkenkopfwalzwerk zum Plattieren, eine Konsole für die Aufnahme von Kühl- und optional Wärmebehandlungsstrecke, ein weiteres Türkenkopfwalzwerk für die Kalibrierung und letztlich die Aufhaspel. Mit der Anlage können Bandbreiten bis 150 mm bei Fügezonenbreiten bis maximal 30 mm gefügt werden. Für das Walzplattieren von Profilen werden einzelne Komponenten ausgetauscht.

In die Anlage eingebunden wurden 2 HF-Generatoren mit 50 bzw. 100 kW Ausgangsleistung sowie zwei Hochleistungs-Scheibenlaser mit 5 bzw. 8 kW Ausgangsleistung. Zwei separate Linienoptiken fokussieren die beiden Laserstrahlen auf 0,2 bzw. 0,4 x 20 mm². Unterschiedliche Laserleistungen und Brennfleckabmessungen ermöglichen in Verbindung mit einer Aufweitung der Wechselwirkungszone des Lasers im Walzspalt ein bestmöglich auf die Werkstoffe angepasstes Temperaturfeld und damit maximale Flexibilität in der Fertigung.

Weltweit erstmalig wurde im Projekt ein Anlagenkonzept zum Laser-Induktions-Walzplattieren realisiert, welches industrielle Ansprüche erfüllt. Die Herstellung von 20 mm breiten, mechanisch hochbelastbaren Al-Cu-Bimetallbändern für Zellverbinder wurde verfahrenstechnisch reproduziert, bedarf jedoch weiterer Optimierung. Eine Ausweitung auf die Herstellung von Halbzeugen aus geometrisch unterschiedlichen Ausgangsbändern sowie Profilen und das Fügen anderer Werkstoffe ist Gegenstand nachfolgender Forschungsprojekte.

5.8 Prozessübergreifende Qualitätssicherungskonzepte

Qualitätsrelevante Eigenschaften von Lithium-Ionen-Zellen

Innovative Produktionstechnologien für die Fertigung von Lithium-Ionen-Zellen erfordern eine ausreichende Überwachung der Prozessparameter, da Erfahrungswerte zur Toleranzstabilität und Zuverlässigkeit der eingesetzten Maschinen und Anlagen für den speziellen Anwendungsfall kaum zur Verfügung stehen. Lithium-Ionen-Zellen mit hoher Leistungsdichte stellen zudem aufgrund der späteren Einsatzbedingungen (hohe Lade- und Arbeitsströme, häufige Ladezyklen, mechanische und thermische Beanspruchung) ein hoch beanspruchtes Produkt mit einer geringen Fehlertoleranz dar. Begleitend zur Technologieentwicklung des Demonstrators wurden daher die für die Qualität von Lithium-Ionen-Zellen relevanten Prozessparameter der Prozesskette identifiziert und ihr möglicher Einfluss auf die Zellqualität bewertet. Dabei gilt es insbesondere, Partikel auf der Elektrodenoberfläche bis zu einer Größenordnung von 20 µm sowie die Gratbildung an den Schnittkanten unter allen Umständen zu vermeiden, um einen internen Kurzschluss durch Beschädigung des Separators auszuschließen.

Die Genauigkeit der Elektrodenablage im Stapel ist ebenfalls ein entscheidender Qualitätsfaktor für die Zelle, da die elektrochemisch wirksame Oberfläche von der exakten Positionierung der Elektroden zueinander abhängt. Für eine hohe Langzeitstabilität sind darüber hinaus besonders die im Zellstapel enthaltene Feuchtigkeit, die vollständige Durchkontaktierung aller Elektroden beim Fügen der Ableiter sowie eine alterungsbeständige Al-Cu-Verbindung mit gleichbleibendem Übergangswiderstand ausschlaggebend.

Qualitätssicherungstechnologien und ganzheitliches Qualitätssicherungskonzept

Zur sicheren Überwachung der identifizierten qualitätskritischen Eigenschaften der Batteriezelle und ihrer Komponenten sind auf Prozessebene vielfältige Inspektions- und Regelungstechnologien erforderlich. In einem Technologie-Screening wurden für die Teilprozesskette zwischen Abrollen des Elektrodenmaterials und Fügen der Ableiter Prüfverfahren identifiziert und hinsichtlich ihres derzeitigen Innovationsgrades bewertet (**Bild 89**). Viele der Technologien sind nach momentanem Kenntnisstand in der Batteriezellenfertigung noch nicht etabliert und erfordern teilweise noch Forschung und Entwicklung. Im Demonstrator wurde die Überwachung besonders kritischer Teilprozesse wie dem Lasersublimationsschneiden sowie der Zellbildung beispielhaft realisiert.

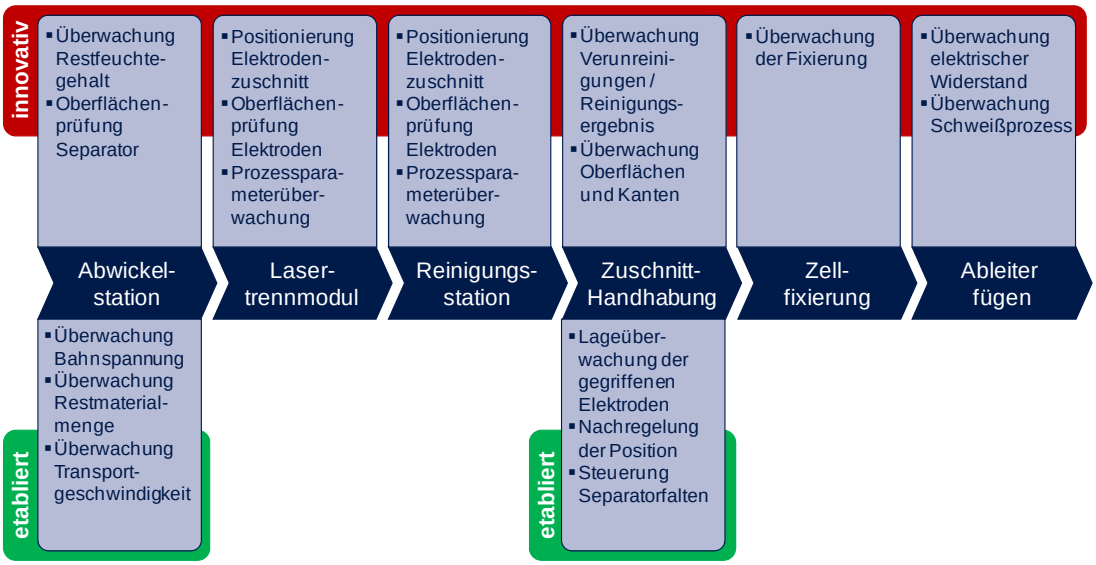


Bild 89: **Identifizierte notwendige Prüfumfänge im Fertigungsprozess für Lithium-Ionen-Zellen und Klassifizierung des technologischen Reifegrades**

Auf der übergeordneten Ebene der Qualitätssicherung müssen nicht nur die momentanen Prozessparameter und Zelleigenschaften überwacht und dokumentiert werden, sondern auch Trends innerhalb der vorgegebenen Toleranzfenster erkannt werden. Notwendige Korrekturmaßnahmen können so früh erkannt und eingeleitet werden. Beispiele für Prozessparameter sind die Schnittgeschwindigkeit beim Lasertrennen, der Maximalruck des Falttisches beim Z-Falten oder die Beschichtungshomogenität der Folienmaterialien.

Da derzeit kaum umfassende Langzeiterfahrungen für den Dauerbetrieb von Hochenergie-Lithium-Ionen-Zellen in der industriellen Praxis existieren, ist es von enormer Wichtigkeit, die entscheidenden Parameter jeder einzelnen Zelle zu dokumentieren und zu archivieren. Falls trotz sorgfältig kontrollierter Produktionsbedingungen ein späterer Versagensfall eintreten sollte, kann eine Qualitätsdatenbank eine Rückverfolgbarkeit von der betroffenen Batterie über deren Einzelzellen bis hinunter auf die Ebene der verwendeten Elektrodenmaterialen erlauben. Damit ist zum einen eine maximale Absicherung des produzierenden Unternehmens hinsichtlich der Produkthaftung gewährleistet, zum anderen können wertvolle Erkenntnisse zu den Ausfallursachen gewonnen werden.

Im Rahmen des DeLIZ-Projekts konnten die Hardware- und steuerungstechnischen Voraussetzungen geschaffen werden, um die bereits realisierten Qualitätssicherungsverfahren in ein ganzheitliches Qualitätssicherungssystem bestehend aus Qualitätsdatenbank, Trend-Monitoring und Qualitätsregelkreisen integrieren zu können.

Qualitätssicherung im Demonstrator

Der erste Produktionsschritt des am *iwb* realisierten Demonstrators besteht im Zuschneiden des auf Rollen bereitgestellten Elektrodenmaterials zu einzelnen Elektroden, so dass hier die Zellqualität bereits entscheidend beeinflusst wird. In Verbindung mit der Einführung eines Lasertrennverfahrens, das klassische Schneidprozesse ersetzt, zeigt sich an dieser Stelle die Notwendigkeit, die praktische Umsetzbarkeit eines Qualitätssicherungskonzeptes beispielhaft zu untersuchen. Zu diesem Zweck sind verschiedene Prüf- und Regelungssysteme in den Demonstrator integriert worden.

Mittels eines Farbsensors werden im Randbereich des noch ungeschnittenen Elektrodenmaterials vom Hersteller markierte Beschichtungsfehler in einer ersten Inspektionsstufe erkannt. Elektroden, die gekennzeichnete Defekte enthalten, werden aus dem Produktionsprozess ausgeschleust. Kamerasysteme erfassen zudem die Lage der Beschichtungskante auf der Ober- und Unterseite des Elektrodenmaterials und die Lage der Laserschnittkante, um die Kontur des Laserzuschnitts optimal zu positionieren (**Bild 90**).



Bild 90: **Erfassung der Beschichtungskante und der Laserschnittkante beim Konfektionieren der Elektroden**

Für eine abschließende Überprüfung der geschnittenen Elektroden wurde weiterhin ein Qualitätssicherungsmodul (QS-Modul) entwickelt und in den Elektrodenschneider integriert (**Bild 91**). Das dort integrierte Kamerasystem ist in der Lage, Fehlstellen wie Partikel, Kratzer und Spritzer auf der Elektrodenoberfläche zu detektieren. Das Inspektionssystem besteht aus einer CCD-Zeilenkamera mit 4096 Pixeln, durch die sich ein Auflösungsvermögen von etwa 50 µm ergibt. Zwei LED-Beleuchtungen, die unter 70° und 90° auf die Elektrodenoberfläche strahlen, ermöglichen Hell- und Dunkelfeldbildaufnahmen.

Nach dem Zuschnitt der Elektroden werden diese von der Handlingeinheit auf dem Vakuumtisch abgelegt, mit einer Linearachse unter dem Kamerasystem verfahren und auf Fehler überprüft. Anschließend wird die Elektrode wieder von der Handlingeinheit aufgenommen, von der Wendeeinheit umgedreht und auf der Unterseite geprüft. Basierend auf der Auswertung des Inspektionssystems wird die Elektrode in ein Magazin für fehlerfreie Teile oder in eine Ablagebox für fehlerbehaftete Teile abgelegt.

Fehlerbehaftete Elektroden werden aus dem Produktionsprozess ausgeschleust, um weitere nicht-wertschöpfende Fertigungsschritte im Sinne der Energie- und Ressourceneffizienz zu vermeiden. Somit wird gewährleistet, dass im nachfolgenden Stapel-Modul nur einwandfreie Elektrodenzuschnitte verarbeitet werden. Zur Klärung der Fehlerursache können die aussortierten Elektroden mit hochauflösenden Verfahren wie beispielsweise dem Lichtmikroskop oder dem Rasterelektronenmikroskop untersucht werden.

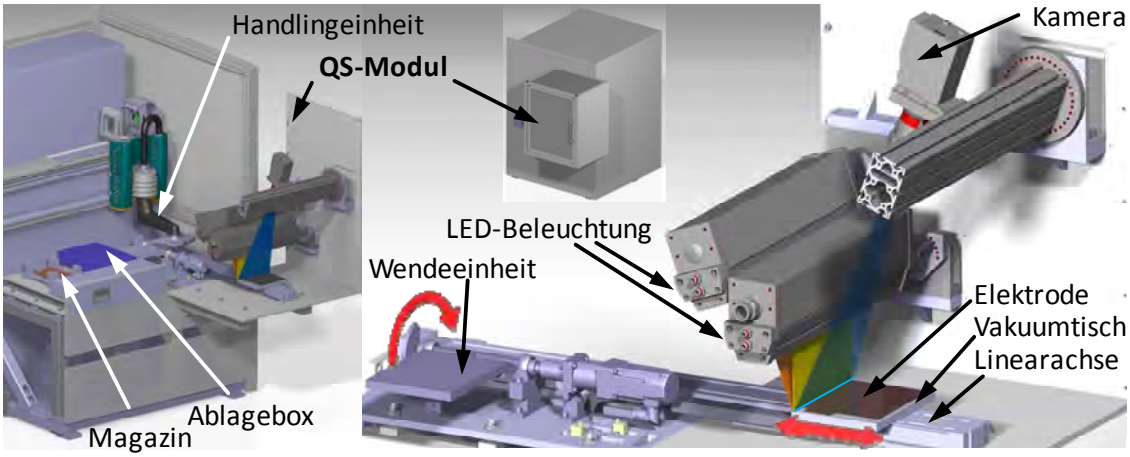


Bild 91: **Aufbau und Komponenten des Qualitätssicherungsmoduls**

Die Geometrie der Zellbildung, insbesondere die Ablagegenauigkeit der Elektroden im Zellstapel, ist eine weitere wichtige Einflussgröße auf die Qualität des Endprodukts. Aus diesem Grund wurden im Z-Falt-Modul des Demonstrators verschiedene optische Systeme zur Vermessung der Position der Elektroden an der Handlingeinheit integriert, um die Elektroden bis zu einer Genauigkeit von 0,1 mm im Stapel positionieren zu können. Nach dem Ablegen wird die Lage der Elektroden auf dem Stapel nochmals überprüft und dokumentiert. Auch an dieser Stelle der Prozesskette konnte durch die praktische Umsetzung des Qualitätssicherungskonzeptes eine Voraussetzung für eine gleichbleibend hohe Zellqualität geschaffen werden.

Experimentelle Bewertung des Qualitätssicherungsmoduls im Demonstrator

Erste Untersuchungen mit dem Inspektionssystem zeigten, dass Verunreinigungen der Elektroden mit Partikeln der Größenordnung 50 µm sowie Kratzer und Spritzer erkannt werden können. In **Bild 92** ist das Inspektionsergebnis von einer mit Fehlern präparierten Elektrode zu sehen. Die Partikel, Kratzer und Spritzer heben sich, wie links dargestellt,

deutlich um mehrere Graustufen vom Materialrauschen des Hintergrunds ab und können so automatisch erkannt werden. Zu jedem gefundenen Fehler wird ein Bild gespeichert und die Position auf der Elektrode in einer Übersicht mit einem roten Viereck markiert. Die Fehlereigenschaften wie Größe, Position, Fläche, Grauwert und Orientierung können für weitere Analysen exportiert werden.

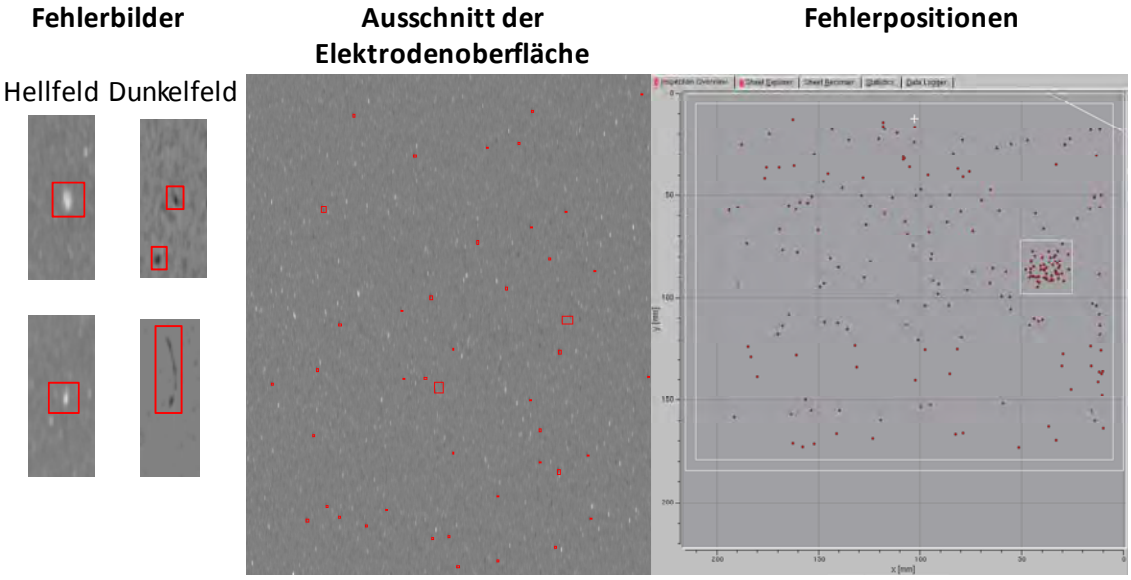


Bild 92: **Vom Inspektionssystem erkannte Fehler auf einer Elektrode sowie deren Position in einer Übersicht**

Die Untersuchungen belegen die Leistungsfähigkeit des Inspektionssystems hinsichtlich einer zuverlässigen automatisierten Erkennung der definierten Fehler auf den Elektroden bis zu einer Größenordnung von 50 µm. Da jedoch auch bei Partikeln bis zu einer Größe von 20 µm ein qualitätsmindernder Einfluss vermutet wird, sollen in weiterführenden Forschungsarbeiten Ansätze zur Steigerung der Auflösung des Inspektionssystems untersucht werden. Im QS-Modul des Demonstrators sind die systemtechnischen Voraussetzungen für eine Optimierung der Beleuchtungseinheiten (Art, Wellenlänge, Winkel) oder den Einbau ergänzender Prüftechnologien wie aktiver Thermografie (siehe nachfolgender Abschnitt) geschaffen worden.

Evaluierung alternativer Prüftechnologien

Im sichtbaren Wellenlängenbereich arbeitende Inspektionssysteme gelangen bei Partikeln in der Größenordnung von 20 µm an ihre technischen Grenzen, da die optische Signatur der Partikel im Bereich des Signalrauschens fehlerfreier Oberflächen liegt. Abhilfe würden hier neue Beschichtungstechnologien für eine höhere Homogenität der Elektrodenoberfläche schaffen. Aktuell laufende und geplante Forschungsaktivitäten zielen bereits auf diese Optimierung ab, da hierdurch auch die Leistungsfähigkeit und Gleichartigkeit einzelner Zellen gesteigert werden kann.

Im Rahmen des DeLIZ-Projekts wurde neben der Integration eines kommerziell verfügbaren Inspektionssystems zur Fehlstellendetektion auf Elektrodenmaterialien auch eine alternative Prüftechnologie evaluiert. Die Wärmefluss-Thermographie bietet hier großes Potenzial, da im infraroten Wellenlängenbereich erheblich höhere Kontraste zwischen Partikeln und Elektrodenoberfläche erzielt werden können. Bedingt durch die geringen Auflösungen der Infrarotkameras ist die inspizierbare Fläche (ca. 40 mm x 40 mm) jedoch im Vergleich zu den verwendeten Elektrodenformaten sehr klein, so dass ein sofortiger industrieller Einsatz mit den damit verbundenen Taktzeitanforderungen derzeit

nicht möglich ist. Da hier die Entwicklung neuer Technologien absehbar ist, wurden im Rahmen des DeLIZ-Projekts erste Vorversuche zur Detektion sehr kleiner Partikel mit diesem Prüfverfahren durchgeführt.

Bild 93 links zeigt die grundlegende Funktionsweise des thermografischen Prüfprinzips. Mittels eines kurzen Lichtblitzes wird die Elektrodenoberfläche zunächst um wenige Grad Kelvin erwärmt. Vorhandene Partikel erwärmen sich dabei deutlich stärker als homogene Beschichtungsbereiche, in denen die Wärme schneller abfließen kann. Durch die Beobachtung dieses Vorgangs mit einer Infrarotkamera kann dieser Effekt zur Fehlerdetektion verwendet werden.

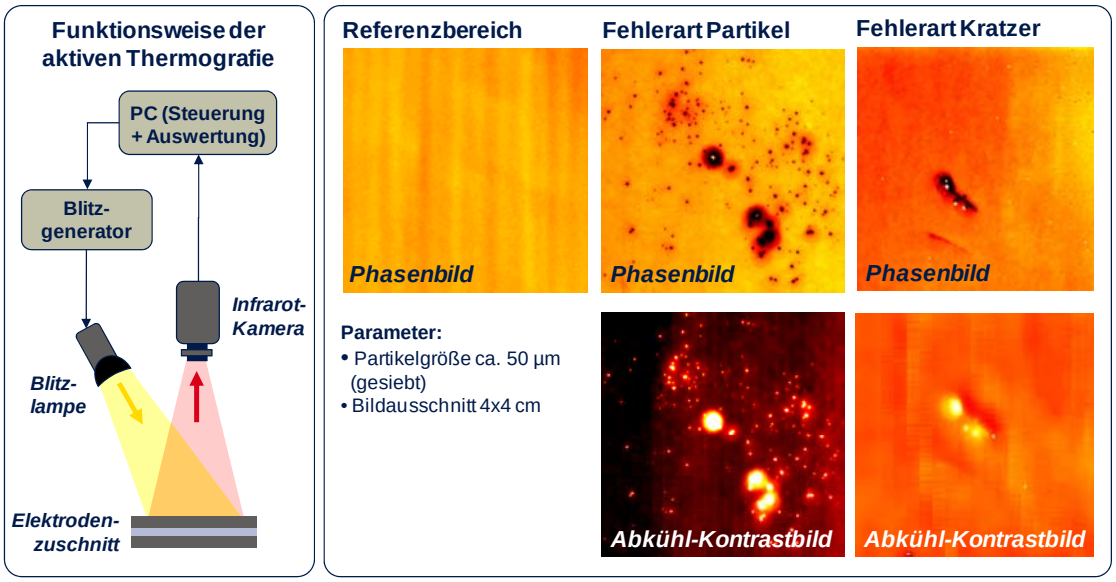


Bild 93: **Funktionsweise der aktiven Thermografie (links); Versuchsergebnisse zur Fehlstellendetektion auf Elektrodenmaterialien (rechts)**

Bild 93 rechts zeigt die Ergebnisse dieser Versuche. Dabei wurden die Bilder des stärksten Kontrasts der Abkühlsequenz ausgewertet und so genannte Phasenbilder erzeugt, welche ein Maß für die zeitliche Änderung von Zuständen sind. Die künstlich aufgebrachten Referenzpartikel sowie Kratzer in der Beschichtung können durch Thermografie mit wesentlich stärkerem Kontrast als durch konventionelle optische Verfahren erkannt werden. Weitergehende Forschungsarbeiten zielen darauf ab, optische und infrarote Inspektionstechniken miteinander zu kombinieren, um die Zuverlässigkeit und Geschwindigkeit der Fehlstellendetektion zu erhöhen.

Fazit

Begleitend zur Technologieentwicklung wurden die für die Qualität von Lithium-Ionen-Zellen relevanten Prozessparameter der Prozesskette identifiziert und ihr Einfluss auf die Zellqualität bewertet. Partikel, Spritzer oder Kratzer auf der Elektrodenoberfläche sowie Grat (z.B. an den Schnittkanten) gilt es unter allen Umständen bei allen Prozessschritten zu vermeiden, um Kurzschlüsse auszuschließen. Im Elektrodenschneider erkennt beispielsweise ein Farbsensor Fehler, die vom Hersteller des Elektrodenmaterials markiert wurden. Ein Kamerasystem mit je einer Kamera auf der Ober- und Unterseite des Elektrodenmaterials erfasst die Lage der Beschichtungskante, um die Kontur des Laserschnitts optimal zu platzieren.

Um die konfektionierten Elektroden zu überwachen, wurde in den Elektrodenschneider ein Inspektionsmodul zur automatisierten Erkennung von Partikeln, Spritzern und Kratzern auf der Elektrodenoberfläche integriert. Das Modul enthält eine Zeilenkamera im optischen Lichtspektrum mit einer Auflösung von 4096 Pixeln bei einer Pixelgröße von 10 x 10 μm^2. Zwei verschiedene LED-Beleuchtungen für Hell- und Dunkelfeld sowie eine Wendeeinheit für die beidseitige Prüfung der Elektrodenoberfläche ergänzen das Kamerasystem. Je nach Ergebnis der Inspektion wird die Elektrode in ein Magazin für fehlerfreie Teile oder in eine Ablagebox für fehlerbehaftete Teile abgelegt. In ersten Versuchen konnten Partikel mit einer Größe von 50 x 50 μm^2 fehlerfrei erkannt werden. Durch die methodische Erstellung von Fehlerkatalogen und die Optimierung der Bildverarbeitungsparameter wurde auch eine Erkennung von noch kleineren Partikeln ermöglicht.

Die Genauigkeit der Elektrodenablage im Stapel ist ebenfalls ein entscheidender Qualitätsfaktor für den Zellstapel, da die elektrochemisch wirksame Oberfläche von der exakten Positionierung der Elektroden zueinander abhängt. Darum sind im Z-Falter optische Systeme zur Vermessung der Position der Elektroden an der Handlingeinheit enthalten, um die Elektroden lagegenau im Stapel zu positionieren. Nach dem Ablegen wird die Lage der Elektroden auf dem Stapel erneut überprüft.

Für eine hohe Langzeitstabilität sind darüber hinaus besonders die im Zellstapel enthaltene Feuchtigkeit, die vollständige Durchkontaktierung aller Elektroden beim Fügen der Ableiter sowie eine alterungsbeständige Al-Cu-Verbindung mit gleichbleibendem Übergangswiderstand entscheidend. Die Entwicklung und Evaluierung von Qualitätskonzepten für diese Eigenschaften bleibt nachfolgenden Forschungsprojekten vorbehalten.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Das Verbundforschungsprojekt mehrerer wissenschaftlicher Einrichtungen betrachtet produktionstechnische Fragestellungen entlang der Prozesskette zur Fertigung von Lithium-Ionen-Zellen. Ausgewählte Fertigungstechnologien und Verfahren sowie die dazu notwendige Maschinen- und Anlagentechnik wurden entwickelt, neue Lösungsansätze für eine kostengünstige Großserienfertigung aufgezeigt.

Der Einsatz von Wasser als Lösungsmittel für die Elektrodenbeschichtung eröffnet durch einen vereinfachten Beschichtungsprozess ein großes Potenzial zur Kosteneinsparung. Durch die Vermeidung von Lösungsmittelemissionen reduzieren sich die investiven und laufenden Aufwände für den Arbeits-, Gesundheits- und Umweltschutz deutlich. Im Rahmen des Projektes erfolgten Beschichtungsversuche unter Verwendung von Mesophasengraphit-Pulver (Anode) und Lithiumeisenphosphat-Pulver (Kathode) als Aktivmaterial und **Wasser als Lösungsmittel**. Es wurden haftfeste und homogene Schichten erzeugt. Mithilfe galvanostatischer Messungen wurden für die Graphit-Anode ca. 270 mAh/g bei einer C-Rate von C/5 nachgewiesen. Für die $LiFePO_4$-Elektrode wurde eine Kapazität von bis zu 140 mAh/g gemessen.

Die Forschungsarbeiten zum Konfektionieren konzentrierten sich im Projekt ausschließlich auf das schneidgasfreie Remote-Schneiden der Ausgangsmaterialien (Anode, Kathode, Separator) mit gepulsten und brillanten cw-Lasern. Um mit dem Laser Schneidgeschwindigkeiten von mindestens 1 m/s zu realisieren, sind sowohl für gepulste (ns- und ps-) als auch für cw-Systeme Laserleistungen größer 50 W für den Separatorschnitt und größer 200 W für den Elektrodenschnitt notwendig. Mit optimierten Prozessparametern ist eine sehr hohe Schnittqualität realisierbar. Die derzeit am Markt verfügbaren cw-Laser mit brillantem Strahlprofil ermöglichen im schneidgasfreien Remote-Schnitt **Schneidgeschwindigkeiten bis zu mehreren hundert m/min**.

Die Bildung und Fixierung des Zellstapels ist einer der entscheidenden wertschöpfenden Prozesse während der Zellherstellung. Basierend auf einer Nutzwertanalyse und einem methodischen Prozessvergleich wurde **für geometrisch bestimmte Zellen** das Z-Falten mit kontinuierlichem Separator und einzelnen Elektrodenfolien als das für die Umsetzung im Projekt zu evaluierende Zellbildungsverfahren identifiziert. Aufbauend auf den technologischen Voruntersuchungen zum Laserstrahlschneiden entstand eine separate vollautomatisierte Anlage zum Lasertrennen und Ablagern von Elektrodenzuschnitten in Magazinen. Die gesamte Anlagentechnik wurde in einem Trockenraum aufgebaut, der eine Prozessatmosphäre mit einem Taupunkt von -48 °C gewährleistet.

Geometrisch unbestimmte Zellformen bedürfen neuer Technologien zur Lageerfassung und Positionierung beim Herstellungsprozess. Die Bewertung relevanter Zellgeometrien hinsichtlich Wirtschaftlichkeit und technologischer Relevanz rückte trapezförmigen Zellen in den Fokus nachfolgender Untersuchungen. Im Rahmen des Projektes wurde auch dafür ein automatisiertes Anlagenmodul entwickelt und aufgebaut. Es entnimmt die zu stapelnden trapezförmigen Einzelfolien aus Magazinen mit definierter Lage und bildet einen geometrisch exakten und reproduzierbaren Folienstapel.

Im Bereich des Fügens der Folienpakete konzentrierten sich die Arbeiten ausschließlich auf das Laserstrahlschweißen, welches im Gegensatz zum Ultraschallschweißen keine mechanische Belastung auf das Folienpaket ausübt. Abrieb von Beschichtungsmaterial und Ablagerung im Separator kann dadurch vermieden werden. Die jeweils 500 µm dicken Cu- oder Al-Ableiter wurden durch die Folien hindurch gegen ein 300 µm dickes Verstärkungsblech des gleichen Werkstoffes gepresst und unter statischem Druck damit verschweißt. Dadurch ergibt sich über alle Folien hinweg eine **stoffschlüssige und somit gut leitfähige Verbindung** zu den Ableitern. Das Verfahren ist für die Integration in den Fertigungsprozess und durchgängige Automatisierungslösung sehr gut geeignet. Die Temperaturbelastung ist für die Zelle insgesamt vernachlässigbar.

Um eine hohe Haftfestigkeit, Dichtheit und Langzeitbeständigkeit zu gewährleisten, müssen die Kontaktfahnen im Bereich der Siegelung vorbehandelt werden. Im Projekt wurde die **lokale Laser-Oberflächenbehandlung** der Al-Kontakte (Ableiter) im Bereich des Vorsiegelbandes (ca. 5 - 6 mm breit) evaluiert. Die Behandlungszeit pro Ableiter beträgt ohne Positionierung ca. 11 s. Die dabei erzielte Langzeitbeständigkeit ist hervorragend und erreicht die Qualität einer Gelbchromatierung. Es ist eine trockene, selektive und umweltfreundliche Methode, die vergleichsweise einfach in den Produktionsprozess integriert werden kann, schnell und kostengünstig ist.

Im Hinblick auf die Verkürzung der Prozesszeit zum Verschalten von Lithium-Ionen-Zellen und die Sicherung langzeitstabiler leitfähiger Verbindungen war die Verfahrensentwicklung zum Verbinden von Cu mit Al ein wesentlicher Forschungsschwerpunkt. Als innovativer Ansatz wurde die Herstellung von Al-Cu-Zellverbindern durch Laser-Induktions-Walzplattieren verfolgt. Bei Walzgeschwindigkeiten von etwa 7,5 m/min wird ein Al-Band über die gesamte Bandbreite von bis zu 20 mm stoffschlüssig mit einem Cu-Band verbunden. Es ist derzeit das einzige Fügeverfahren, mit dem **Al und Cu ohne Ausbildung spröder intermetallischer Phasensäume stoffschlüssig und mit hoher Effizienz gefügt** werden kann.

Weltweit erstmalig wurde im Projekt ein **Anlagenkonzept zum Laser-Induktions-Walzplattieren realisiert**, welches industrielle Ansprüche erfüllt. Mit der Anlage können Bandbreiten bis 150 mm bei Fügezonenbreiten bis maximal 30 mm gefügt werden. Für das Walzplattieren von Profilen werden einzelne Komponenten ausgetauscht. Die Herstellung von 20 mm breiten, mechanisch hochbelastbaren Al-Cu-Bimetallbändern für Zellverbinder wurde verfahrenstechnisch reproduziert, bedarf jedoch einer weiteren Optimierung. Eine Ausweitung auf die Herstellung von Halbzeugen aus geometrisch unterschiedlichen Ausgangsbändern sowie Profilen und das Fügen anderer Werkstoffe ist Gegenstand nachfolgender Forschungsprojekte.

Die für die Qualität von Lithium-Ionen-Zellen relevanten Prozessparameter der Prozesskette wurden identifiziert und ihr Einfluss auf die Zellqualität bewertet. Partikel, Spritzer oder Kratzer auf der Elektrodenoberfläche sowie Grat (z. B. an den Schnittkanten) gilt es unter allen Umständen bei allen Prozessschritten zu vermeiden, um Kurzschlüsse auszuschließen. Um die konfektionierten Elektroden zu überwachen, wurde in den Elektrodenschneider ein Inspektionsmodul zur automatisierten Erkennung von Partikeln, Spritzern und Kratzern auf der Elektrodenoberfläche integriert. In ersten Versuchen konnten Partikel mit einer Größe von 50 x 50 µm² fehlerfrei erkannt werden. Durch die methodische Erstellung von Fehlerkatalogen und die Optimierung der Bildverarbeitungsparameter wurde auch eine Erkennung von noch kleineren Partikeln ermöglicht.

7 Veröffentlichungen zum Projekt

[1] Fux, V.: Walzplattierte Aluminium-Kupfer-Verbinder , IWS Jahresbericht 2010, S. 42/43, Dresden 2011

[2] Kurfer, J.; Zeilinger, T.; Moesl, J.: Produktionstechnisches Demonstrationszentrum für Lithium-Ionen Zellen. Berliner Kreis News Ausgabe 15, S.14-15, Berlin 2010

[3] Lütke, M., Franke, V., Techel, A., Himmer, T., Klotzbach, U., Wetzig, A. & Beyer, E. (2011). "A Comparative Study on Cutting Electrodes for Batteries with Lasers." Physics Procedia 12: 286-291.

[4] Reinhart, G.; Kurfer, J.; Heinz, M.; Zeilinger T.: Forschungs- und Produktionszentrum für Hochleistungsenergiespeicher. ATZ Produktion 02/2011, Jahrgang 4, S.54-57, Kaufering 2011

[5] Reinhart, G.; Kurfer, J.: Handhaben in der Batteriefertigung. wt Werkstatttechnik online 101 (2011) 9, S. 545-550.

[6] Reinhart, G.; Westermeier, M.; Kurfer, J.; Zeilinger, T.: Forschungs- und Produktionszentrum für elektrochemische Hochenergiespeicher. Mobility 2.0 Oktober 2011. – *im Druck* –

[7] Techel, A.: Das produktionstechnische Demonstrationszentrum für Lithium-Ionen-Zellen, Dresdner Transferbrief 1/11, S. 12

[8] Techel, A., Jansen, I; Rechner, R.: Lasertechnik für Lithium-Ionen-Zellen - Mobilitätsforschung in Dresden, Photonik 3/2011, S. 12

[9] Zeilinger, T.; Moesl, J.; Kurfer, J.: Produktionstechnisches Demonstrationszentrum für Lithium-Ionen-Zellen. *iwb* Newsletter 03/2010, S.1-3, München 2010

[10] Zeilinger, T.; Kurfer, J.: Produktionstechnisches Forschungs- und Demonstrationszentrum für Lithium-Ionen-Zellen. *iwb* Jahresbericht 2010, S.4-5, München 2011

8 Anschriften der Kooperationspartner

Fraunhofer-Institut für Werkstoff- und Strahltechnik IWS
Dr. Anja Techel
Winterbergstraße 28
01277 Dresden
anja.techel@iws.fraunhofer.de
www.iws.fraunhofer.de

Technische Universität Dresden
Prof. Eckhard Beyer
Institut für Oberflächen- und Fertigungstechnik IOF
01062 Dresden
eckhard.beyer@tu-dresden.de
www.iof.mw.tu-dresden.de

Prof. Werner Hufenbach
Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik ILK
01062 Dresden
ilk@ilk.mw.tu-dresden.de
www.ilk.mw.tu-dresden.de

Prof. Knut Großmann
Institut für Werkzeugmaschinen und Steuerungstechnik IWM
01062 Dresden
mailbox@iwm.mw.tu-dresden.de
www.iwm.mw.tu-dresden.de

Technische Universität München
Prof. Gunther Reinhart
Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften *iwb*
Boltzmannstr. 15
85748 Garching
Gunther.reinhart@iwb.tum.de
www.iwb.tum.de

Projektträger:
Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Projektträger Karlsruhe
Produktion und Fertigungstechnologien (PTKA-PFT)
Außenstelle Dresden
Dipl.-Ing. Jürgen Schelisch
Hallwachsstraße 3
01069 Dresden
juergen.schelisch@kit.edu
www.produktionsforschung.de

Elektroantriebe gelten als die Antriebe der Zukunft. Sie arbeiten wesentlich effektiver als Verbrennungsmotoren, sind leise und abgasfrei. Nahezu alle Fahrzeughersteller weltweit arbeiten intensiv an Elektroantrieben für Busse, Pkws, Motorroller und Fahrräder. Massive Investitionen in Forschung und Entwicklung werden getätigt, um auch in der Bundesrepublik Deutschland wieder Kompetenzen im Bereich der Batterieproduktion aufzubauen.

Innovative produktionstechnische Lösungen entlang der gesamten Prozesskette zur Herstellung von Lithium-Ionen-Batterien müssen schnell in einen serientauglichen Status überführt werden. Um eine wettbewerbsfähige, automatisierte Serienproduktion von Lithium-Ionen-Batterien basierend auf großformatigen Lithium-Ionen-Zellen zu etablieren, sind geeignete Fertigungstechnologien und Verfahren sowie die dazu notwendige Maschinen- und Anlagentechnik neu oder weiter zu entwickeln. Dabei liegen in nahezu allen Prozessschritten große technische Herausforderungen.

Die Forschungsarbeiten der im DeLIZ-Projekt beteiligten Einrichtungen hatten das Ziel, großserientaugliche Prozesse und Anlagentechnik zur Fertigung von großformatigen Lithium-Ionen-Zellen zu evaluieren und weiterzuentwickeln sowie kurzfristig Kostensenkungspotenziale aufzuzeigen. Von Mai 2010 bis Juni 2011 erforschten und entwickelten 15 Wissenschaftler und 6 Techniker aus drei wissenschaftlichen Einrichtungen innovative Prozesse und Anlagentechnik zur Fertigung von großformatigen Lithium-Ionen-Zellen.

Die vorliegende Broschüre fasst die Ergebnisse der Forschungsarbeiten zusammen, um das erarbeitete Wissen weiterzugeben und einer breiten Nutzung zuzuführen.

ISBN 978-3-8396-0339-0

9 783839 603390