

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages



Schlussbericht zum Teilvorhaben

## **„Entwicklung von Anlagenkomponenten für das Laserbonden von Batteriezellen“**

### **Im Verbundvorhaben Leopard**

*Laserbonden als schonende Verschaltung Temperatursensitiver Zellen der nächsten Generation für die Energiewende*

Kennzeichen: 03EI4026C  
Bewilligungszeitraum: 01.05.2021 – 31.1.2025  
Berichtszeitraum: 01.05.2021 – 31.1.2025

**Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor. N**

Name: Herr Dr. Hans-Georg von Ribbeck  
Adresse: Daimlerstr. 5, 85521 Ottobrunn  
Telefon: 089 62995 126  
E-Mail: [hans-georg.vonribbeck@de.fkdelvotec.com](mailto:hans-georg.vonribbeck@de.fkdelvotec.com)

# Inhalt

<b>1</b>	<b>Kurzdarstellung .....</b>	<b>3</b>
	Aufgabenstellung .....	3
	Voraussetzungen .....	4
	Planung und Ablauf des Vorhabens.....	5
	Wissenschaftlich technischer Stand .....	8
	Zusammenarbeit mit anderen Stellen .....	8
<b>2</b>	<b>Eingehende Darstellung.....</b>	<b>10</b>
	Verwendung der Zuwendung und Ergebnisse.....	10
	Kurzübersicht.....	10
	AP 2    Weiterentwicklung Laserbonden von Batteriezellen .....	11
	AP 6    Techno-ökonomische Bewertung.....	37
	Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises.....	41
	Notwendigkeit der Arbeit .....	41
	Verwertbarkeit der Ergebnisse .....	42
	Relevante Ergebnisse von dritter Seite.....	43
	Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen.....	44

## 1 Kurzdarstellung

### Aufgabenstellung

Im Zentrum des Projekts LEOPARD steht die Entwicklung einer technologisch fortschrittlichen, langzeitstabilen und kosteneffizienten Verschaltung temperatursensitiver Batteriezellen für die Energiespeicherung der nächsten Generation. Ziel ist es, das Laserbonden als zuverlässige Fügetechnologie für unterschiedlichste Batteriezelltypen weiterzuentwickeln, um einen wesentlichen Beitrag zur Umsetzung der Energiewende zu leisten. Dabei sollen insbesondere Aspekte wie Flexibilität im Zelltyp, Prozesssicherheit, Materialeffizienz sowie die Integration von 2nd-Use- und Recyclinganforderungen berücksichtigt werden.

Ein zentraler Schwerpunkt liegt in der Weiterentwicklung einer industriellen Laserbondanlage mit gepulsten Laserstrahlquellen zur flexiblen und intelligenten Verschaltung von Batteriezellen. Die Prozessentwicklung umfasst sowohl die einseitige Kontaktierung unterschiedlicher Zelltypen als auch die automatisierte Bewertung der Bondqualität durch die intelligente Verknüpfung prozessrelevanter Messsignale. Ziel ist die Etablierung stabiler Prozessfenster zur Reduktion von Ausschussraten und zur Sicherstellung hoher Verbindungsqualität.

Simulationen und techno-ökonomische Bewertungen begleiten die Entwicklung, um die industrielle Anwendbarkeit und den wirtschaftlichen Nutzen der Technologie zu validieren. Die resultierenden Erkenntnisse fließen in die Gestaltung von Demonstrator-Batteriepacks ein, die im Rahmen des Projekts hergestellt, getestet und mit bestehenden Lösungen verglichen werden.

Die Ziele im Einzelnen:

- Evaluation von unterschiedlichen Laserstrahlquellen und Materialkombinationen für das Laserbonden von Batteriezellen.
- Weiterentwicklung der Beobachtung von Prozesssignalen zur besseren Prozessabsicherung
- Konzeptionierung und Erprobung einer optimierten, schnellen Diagnostik der Einschweißtiefe als wichtiges Qualitätskriterium einer guten Fügestelle
- Weiterentwicklung der Möglichkeiten zur einseitigen Kontaktierung von Batteriezellen für diverse Batteriezelltypen
- Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen der entwickelten Prozesse und Anlagenteile sowie eine Kosten-Nutzen-Rechnung für potentielle Kunden
- Analyse des Technologietrends im Feld der Batteriepackkonfektionierung und dahingehende Analyse der Wettbewerbsfähigkeit der optimierten Anlage und Prozessführung

## Voraussetzungen

Das Forschungsvorhaben wurde im Rahmen des 7. Energieforschungsprogramms des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz realisiert. Die zugrunde liegende Förderbekanntmachung benannte spezifische förderpolitische Zielsetzungen, welche im Verlauf des Projekts systematisch adressiert wurden. Eine tabellarische Gegenüberstellung, unten, zeigt auf, in welcher Weise die Projekthalte zur Erfüllung dieser Zielsetzungen beigetragen haben.

Förderpolitisches Ziel	Adressierung im Projekt LEOPARD
<b>1. Reduktion der Kosten durch höhere Wirkungsgrade und optimierte Produktion</b>	Entwicklung einer Laserbondanlage mit erhöhtem Durchsatz und intelligenter Prozessführung, u. a. durch automatisierte Analyse von Prozesssignalen, Integration neuer Laserquellen und verbesserte Prozesssteuerung.
<b>2. Stärkung der Wettbewerbsfähigkeit deutscher Unternehmen und Schaffung zukunftsfähiger Arbeitsplätze</b>	Beteiligung führender deutscher Akteure: F & K DELVOTEC (Anlagentechnologie), BMZ (Batteriesysteme) und Fraunhofer ISE (Forschung). Ausbau der Aktivitäten im Bereich Batterierschaltung, Sicherung und Ausbau von Expertise und Arbeitsplätzen.
<b>3. Beitrag zur Flexibilisierung des Energiesystems durch wirtschaftliche, sichere und standardisierte Stromspeicher</b>	Optimierung der Batterierschaltung als zentraler Fertigungsschritt zur Verbesserung von Qualität, Sicherheit und Langzeitstabilität. Steigerung des Automatisierungsgrads sowie Berücksichtigung von 2nd-Use und Recycling für mehr Nachhaltigkeit.
<b>a4. Erweiterung der Forschung entlang der Wertschöpfungskette der Batterie</b>	Fokus auf die Batterierschaltung als kostenrelevanten Teil der Wertschöpfung. Entwicklung von Prozessen zur Verbinder-Dimensionierung, Reduktion von Ausschuss und Einsatz kostengünstiger Materialien wie Kupfer und Aluminium. Zusammenarbeit von Industrie und Forschung zur praxisnahen Weiterentwicklung.
<b>5. Weiterentwicklung und Optimierung von Komponenten für Anwendungsspezifik und Systemsicherheit</b>	Zielgerichtete Weiterentwicklung der Schaltungstechnologie zur Sicherstellung der zuverlässigen und sicheren Funktion von Batteriespeichern unterschiedlicher Anwendungsbereiche.
<b>6. Steigerung der Reproduzierbarkeit und Reduktion des Energieaufwands durch Fehlervermeidung und Automatisierung</b>	Entwicklung eines Systems zur automatisierten Prozessabsicherung mit Früherkennung von Fehlern. Steigerung von Durchsatz und Flexibilität, Reduktion des Ausschusses sowie Kostensenkung bei gleichzeitiger Qualitätssicherung.

Der Projektzeitraum von Mai 2021 bis Januar 2025 fiel in eine Phase erheblicher externer Herausforderungen. Die COVID-19-Pandemie, die daraus resultierende wirtschaftliche Unsicherheit sowie der Angriffskrieg Russlands gegen die Ukraine führten zu einer Energiekrise und einer spürbaren Inflation in Deutschland und Europa. Diese Rahmenbedingungen hatten direkte Auswirkungen auf die Projektumsetzung, insbesondere in Bezug auf Materialverfügbarkeit, Planungssicherheit und Personalressourcen.

Darüber hinaus unterliegt der Markt für Batteriemodule und -packs einem dynamischen Wandel. Neue Anforderungen sowie technologische Entwicklungen erfordern eine hohe Innovationsgeschwindigkeit und Anpassungsfähigkeit. Diese Marktdynamik beeinflusste nicht nur die Arbeiten beim industriellen Projektpartner BMZ, sondern wirkte sich auch auf die Projektdurchführung am Fraunhofer ISE sowie bei den weiteren beteiligten Institutionen aus.

## Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Projekt wurde in acht Arbeitspakete (AP) unterteilt, die eine strukturierte Bearbeitung der technologischen, ökonomischen und organisatorischen Ziele ermöglichten. Die Projektkoordination (AP 1) lag beim Fraunhofer ISE und umfasste die übergreifende Steuerung, die Kommunikation zwischen den Projektpartnern sowie die Einhaltung der förderrechtlichen Vorgaben. Die Bearbeitung der inhaltlichen Schwerpunkte erfolgte in den AP 2 bis AP 8, jeweils unter Federführung eines verantwortlichen Projektpartners.



In Arbeitspaket 7 entwickelte das Fraunhofer ISE auf Grundlage experimenteller Daten simulationsgestützte Modelle zur optimalen Dimensionierung von Zellverbindern. Diese ermöglichen eine anwendungsbezogene, materialsparende Auslegung der Verbinderelemente unter Berücksichtigung elektrischer, thermischer und mechanischer Anforderungen.

Die definierten Meilensteine wurden in den jeweiligen Arbeitspaketen erreicht. Die enge Zusammenarbeit zwischen den Partnern sowie eine klare Zuständigkeitsverteilung trugen maßgeblich zum erfolgreichen Projektverlauf bei.

## Änderungen zur ursprünglichen Planung:

- Im Verlauf der Projektbearbeitung zeigte sich durch Rückmeldungen aus dem Markt für Batterieprodukte, dass die einseitige Verschaltung von Batteriezellen für viele Anwendungen nicht nur vorteilhaft, sondern zunehmend als technologische Notwendigkeit betrachtet wird. Die damit verbundenen Vorteile wurden im Projektverlauf deutlich bestätigt. Für den Projektpartner BMZ wurde die Weiterentwicklung hin zu einer Produktionslinie mit einseitiger Zellkontaktierung als entscheidend für die künftige Wettbewerbsfähigkeit erkannt.
- Daher wurde im Konsortium gemeinsam entschieden, den ursprünglich geplanten technologischen Vergleich zwischen einseitiger und zweiseitiger Kontaktierung (AP 8.5) zugunsten einer vertieften Fokussierung auf die einseitige Verschaltung entfallen zu lassen. Die hierfür vorgesehenen Ressourcen wurden erfolgreich in den Simulationsbereich umgeleitet, wo sie zur nachhaltigen Stärkung der wirtschaftlichen und wissenschaftlichen Anschlussfähigkeit des Projekts beitrugen.
- In AP 8.4 wurden die geplanten Arbeiten zur technischen Analyse industrieller Batteriepacks gezielt angepasst. Statt der ursprünglich vorgesehenen Analysen wurden ein weiteres Batteriemodul mit Zellen des Typs 21700 und einseitiger Kontaktierung aufgebaut und getestet. Diese Arbeiten führten zu einer signifikanten Erhöhung des Technologiereifegrads der entwickelten Laserbondlösung. Es gelang im Projekt, die anspruchsvolle einseitige Verschaltung mithilfe des Laserbonders erfolgreich umzusetzen. Dies stellt einen technologischen Fortschritt dar, der den Nachweis für die industrielle Reife des Laserbondverfahrens in besonderem Maße erbrachte. Gleichzeitig wurden dadurch die wirtschaftlichen und wissenschaftlichen Verwertungsziele besser erfüllt als im ursprünglichen Projektverlauf vorgesehen – insbesondere durch die Stärkung der Marktstellung von BMZ und F & K DELVOTEC sowie durch die wissenschaftliche Weiterentwicklung am Fraunhofer ISE.
- Im Rahmen von AP 3.3 zur Prozessoptimierung der einseitigen Kontaktierung wurde ein zusätzlicher, bislang unbeachteter Einflussfaktor identifiziert: die Strömungsdynamik des Spülgases im Bereich der Fügestelle. Diese zeigte sich als wesentlicher Parameter für die Prozessstabilität und die Qualität der Schweißnaht. Insbesondere bei Langzeitversuchen wurden Schweißabbrüche beobachtet, die durch unzureichende Entfernung von Schmauchgasen erklärbar sind. Eine hohe Strömungsgeschwindigkeit des Crossjets – notwendig zum Schutz der Optik – beeinflusste ebenfalls den Schweißprozess signifikant.

- Um diesen neuen Herausforderungen fundiert begegnen zu können, wurde im Projektverlauf entschieden, eine Durchführung von Strömungssimulationen im Bondtool hinzuzuziehen. Ziel war es, ein optimiertes Design der Gasdüsen und Abgasführungen zu entwickeln, ohne übermäßige Ressourcen in praktische Testreihen investieren zu müssen. Die Maßnahme ermöglichte eine belastbare Weiterentwicklung des Bondtools im Hinblick auf die Anforderungen der einseitigen Verschaltung.
- Aufgrund pandemiebedingter Einschränkungen und weiterer externer Verzögerungen – u. a. in den Arbeitspaketen 5.5, 8.2, 8.3, 8.4, 7.2, 7.3 und 7.4 – wurde das Projekt um neun Monate kostenneutral verlängert. Diese Verlängerung stellte sicher, dass alle Arbeitspakete mit hohem Verwertungspotenzial erfolgreich abgeschlossen werden konnten.

## Wissenschaftlich technischer Stand

Batteriespeicher sind eine Schlüsseltechnologie für die Elektromobilität und die dezentrale Energieversorgung. Einzelzellen bieten in vielen Anwendungsfällen jedoch nicht die erforderliche Kapazität, weshalb Batterien zu Modulen und Packs verschaltet werden. Die Verbindungstechnik erfolgt auf mehreren Ebenen, wobei insbesondere die Modulverschaltung von hoher Relevanz ist, da sie entscheidend die Leistungsfähigkeit, Sicherheit und Effizienz des gesamten Speichersystems beeinflusst.

Je nach Zelltyp – z. B. Rundzellen, Pouchzellen oder prismatische Zellen – kommen unterschiedliche Kontaktformen und Verbindungstechniken zum Einsatz. Gängige Verfahren wie Widerstandspunktschweißen, Ultraschallschweißen, Laserstrahlschweißen oder Ultraschallbonden müssen komplexe Anforderungen erfüllen: geringe Kontaktwiderstände, hohe Temperaturwechselbeständigkeit, dauerhafte mechanische Stabilität sowie minimale thermische Belastung der Zellen. Zudem müssen in der Regel ungleiche Metalle (z. B. Aluminium, Kupfer, vernickelter Stahl) zuverlässig gefügt werden, insbesondere bei Batterien mit hoher Strombelastung und Schnellladefähigkeit.

Das Laserbonden stellt im Vergleich zu etablierten Verfahren einen innovativen Ansatz dar. Es vereint Vorteile des Laserschweißens und Bondens, ermöglicht breite, widerstandsarme Verbindungen mit hoher mechanischer Festigkeit und geringem Wärmeeintrag. Besonders geeignet ist es für das Fügen ungleicher Materialien und die kontaktarme Integration von Zellverbindern, wodurch die Flexibilität der Fertigung erhöht wird. Im Gegensatz zu anderen Verfahren bestehen beim Laserbonden kaum Einschränkungen hinsichtlich der Verbinderdimensionierung, was es für hochstromfähige Anwendungen attraktiv macht.

Die Technologie adressiert zentrale Herausforderungen des dynamischen Batteriemarkts: Sie unterstützt die Automatisierung, ermöglicht eine hohe Fertigungsqualität durch digitale Prozessüberwachung und bietet Potenzial für den 2nd-Use und das Recycling von Batteriemodulen.

## Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Das Projekt wurde in enger Zusammenarbeit zwischen der BMZ Germany GmbH (Förderkennzeichen: 03EI4026B), F & K DELVOTEC Bondtechnik GmbH (Förderkennzeichen: 03EI4026C) und dem koordinierenden Partner Fraunhofer ISE durchgeführt. Die Gesamtprojektleitung lag beim Fraunhofer ISE, das die übergeordnete Koordination sowie die Abstimmung der Arbeitspakete verantwortete.

Die Kooperation der Partner war durch einen intensiven fachlichen Austausch geprägt. Neben regelmäßigen persönlichen Treffen und Telefonkonferenzen fanden halbjährlich offizielle Projekttreffen statt – teils virtuell, teils in Präsenz. Diese dienten der Zwischenbilanz, der Feinabstimmung technischer Schnittstellen sowie der strategischen Weiterentwicklung des Projektverlaufs.

Die Arbeitspakete wurden organisatorisch so strukturiert, dass die jeweiligen Zuständigkeiten der Partner klar voneinander abgegrenzt waren. Jedes Unterarbeitspaket und jeder Meilenstein war einem spezifischen Projektpartner zugeordnet, wie aus der farblichen Codierung in Projektplan, Meilensteinübersicht und den strukturierten Kopfzeilen der AP-Beschreibungen hervorging.

Im Rahmen der Arbeitsteilung übernahm F & K DELVOTEC die technologische Weiterentwicklung des Laserbonders mit dem Ziel, eine verbesserte Prozesskontrolle zu realisieren. BMZ verantwortete die Erarbeitung industrieller Anforderungen an das Laserbonden sowie die Entwicklung von Demonstrator-Batteriepacks mit lasergebundenen Fügestellen unter realistischen Produktionsbedingungen. Das Fraunhofer ISE konzentrierte sich auf die messtechnische Charakterisierung zur Prozessabsicherung sowie auf die Entwicklung simulationsbasierter Modelle zur Dimensionierung und Auslegung von Zellverbindern.

Diese zielgerichtete Arbeitsteilung ermöglichte eine effiziente Bearbeitung der Projekthinhalte. Die Partner unterstützten sich wechselseitig, insbesondere durch den Austausch von Materialien, Proben und Know-how. Die intensive, kooperative Zusammenarbeit war ein entscheidender Erfolgsfaktor für das Erreichen der wissenschaftlichen und technologischen Projektziele.

Es sind keine FuE-Aufträge an Dritte vorgesehen. Es gibt keine weiteren Partner ohne Förderung im Projekt.

## 2 Eingehende Darstellung

### Verwendung der Zuwendung und Ergebnisse

#### Kurzübersicht

- AP 2.1
  - Erreichung von Projektmeilenstein 2-18, die erfolgreiche „Integration der Nanosekunden Laserstrahlquelle in den Laserbonder“ im Oktober 2022
    - AP 2.1: Erfolgreiches Bändchenschweißen mit Nanosekundenlaser
  - alternative Strahlquelle erfolgreich integriert
    - Schweißvergleich Nanopulse und cw Laser bei 0,5mm Al
    - Test weiterer Laserquellen → grüne Laserquelle mit 515nm
    - Test der 515nm Strahlquelle zur Batteriekontaktierung
- AP 2.2
  - Prozessabsicherung durch Weiterentwicklung der Beobachtung von Prozesssignalen
  - Rückreflexbasierende Prozessüberwachung wurde elektronisch-, sensor- und softwareseitig implementiert.
  - Echtzeitintegration Precitec LWM Daten
  - Abschluss Echtzeitfähige Prozessüberwachung
- AP2.3
  - Auswertung der Nanopulsgeschweißten Batteriezellen auf Haltbarkeit
  - Spezifikation der Echtzeit Prozessüberwachung
  - Umsetzung der Echtzeit Prozessüberwachung
  - Echtzeit Prozessüberwachung in Bondersoftware für Schweißsegment basierten Analyse integriert
  -
- AP 2.4 Weiterentwicklung der einseitigen Kontaktierung
  - Laser Geometrie Editor für die Programmierung exakter einseitiger Kontaktierung der Batteriezellen weiterentwickelt und in Vorversuchen sowie beim Fraunhofer ISE getestet.
  - Definition, Charakterisierung und Umsetzung der Wobble-Amplitudenkalibration mittels Kennfelder
  - Laser Geometrie Editor für die Programmierung exakter einseitiger Kontaktierung der Batteriezellen weiterentwickelt und in Vorversuchen sowie beim Fraunhofer ISE im Test
  - Durchführung erster Strömungssimulationen für eine optimierte Spül- und Schutzgaszufuhr beim Schweißprozess
  -
- AP 6.1
  - Kostenrechnung für Nanopulse Laserbonder
- AP 6.2

- Entwicklung eines TCO Analyse Tool
- Analyse technischem und wirtschaftlichem Nutzen in unterschiedlichen Usecases
- AP 6.4
  - Vergleich der entwickelten Nanosekunden Laserbond-Anlage mit dem Technologietrend

## AP 2 Weiterentwicklung Laserbonden von Batteriezellen

### Meilensteine im Berichtszeitraum

Der Meilenstein 2-18, die erfolgreiche „Integration der Nanosekunden Laserstrahlquelle in den Laserbond“ wurde im Oktober 2022 erreicht

#### 2.1.1.1 AP 2.1 Evaluation und Integration von alternativen Laserstrahlquellen für das Laserbonden von Batteriezellen

##### Mechanische Integration:

Die vorgesehene Nanosekunden gepulste Strahlquelle ist grundsätzlich kompatibel zu dem existierenden Optikaufbau der Maschine. Der Kollimator am Ende des Lichtleiters der Strahlquelle wurde vom Hersteller TRUMP Faserkopf im Vergleich zu dem ursprünglich vorgesehenen Gerät beträchtlich abgeändert ( Siehe **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). Der neue Typ hat nun etwa das Vierfache Gewicht und Volumen.

Um diese zu integrieren und zu kompensieren, musste die Maschine umfangreich konstruktiv und ansteuerungstechnisch angepasst werden, auch da sich die bewegte Masse signifikanten Einfluss auf das 4-Achssystem des Laserbonders hat. Um den statischen Massenzuwachs auszugleichen, wurden Massenkompensationssysteme geprüft, um die Motoren der Z-Achse zu entlasten und die Bewegungsdynamik in Z nicht einzuschränken.

Die erhöhte Masse des Faserkopfes hatte nach Prüfung keine mechanische oder konstruktive Massenkompensation der z-Achse nach sich gezogen, sondern konnte durch das Anpassen der Achsensteuerungsparameter ausgeglichen werden.



Abbildung 1 Faserstecker des Nanosekunden Lasers

Die nötige gewordene verstärkte Fasersteckerhalterung wurde gefertigt und in die bestehende Maschine integriert.

Die Kompatibilität der bestehenden Optikkomponenten von der Firma Precitec mit TRUMPF Komponenten konnte durch einen eigens Designen Adapterflansch erreicht werden.

#### Sicherheitsaspekte

Der integrierte Nanosekundenlaser wurde samt Gehäuse abgenommen und hat die Klassifizierung Laserklasse 1 erhalten. Dabei wurde die notwendige Schnellabschaltung des Lasers in den Sicherheitskreis der Maschine integriert.

#### Steuerungstechnik

Die Leistungsansteuerung der Nanosekunden Laserquelle konnte über die Bondersoftware direkt realisiert werden, was wesentliche Voraussetzung für die Verwendung von Leistungsrampen in Anfang und Endphase der Schweißung und damit der kontrollierten Prozessführung ist. Die Ansteuerung der weiteren Lasermodi erfolgt weiter über die Softwareschnittstelle des Herstellers, diese hat sich jedoch in Tests bisher bewährt, weshalb eine Implementation der Steuerungsbefehle (entweder als Digital oder Analogsignal) in die Anlagensteuerung als nicht wesentlich identifiziert und im Falle einer Industrialisierung der Maschine implementiert wird.



Abbildung 2 Laserschaltschrank mit Steuerungs-PC mit Lasersteuerung und Laserparametrisierung per Software.

## Testschweißungen und Schweißergebnisse

Mit der vollintegrierten Nanosekunden Laserquelle konnten erfolgreich Tests mit Aluminium-ribbon auf Aluminiumsubstraten verwirklicht werden. (Siehe Abbildung 3 und Abbildung 4)

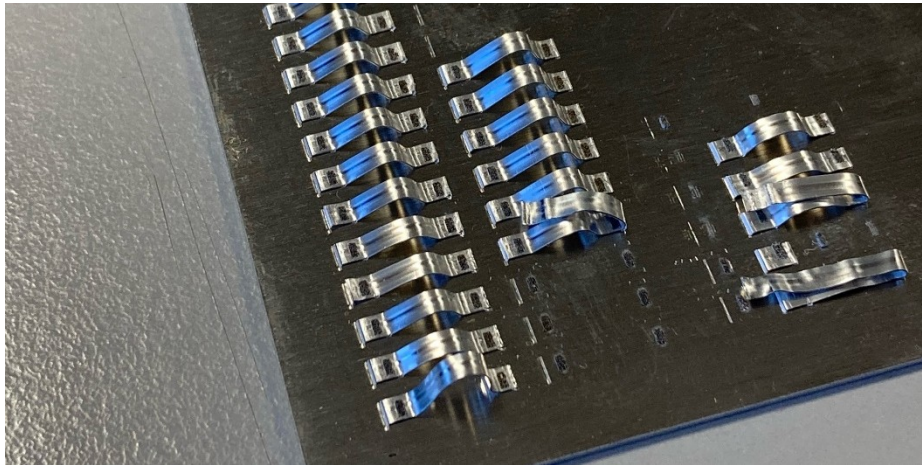


Abbildung 3 Testreihe von Nanosekunden-Puls geschweißten Aluminiumribbons (2x0,2mm) auf Aluminiumsubstrat

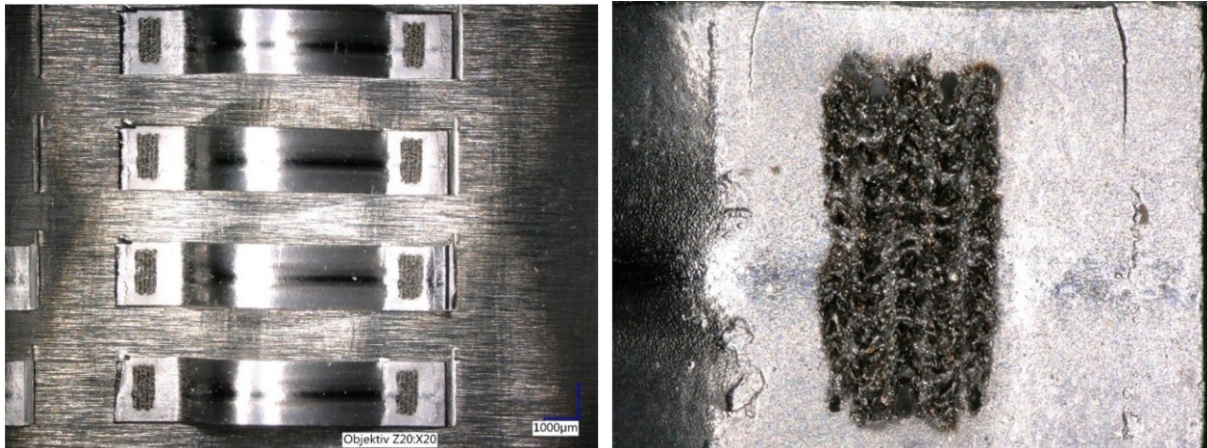


Abbildung 4 Detailaufnahmen der gebondeten Aluminiumbändchen. Links:20x und rechts:100x Vergrößerung. Sichtbar sind die 5 Schweißlinien. Die Schweißparameter sind noch nicht optimiert.

In weiteren Tests wurden die maximalen Einschweißtiefen ermittelt, die ergaben eine Materialstärke von 0,5mm für Aluminium bei einem fünftel der Schweißgeschwindigkeit im Vergleich zu 0,2mm Aluminium ( Auf Aluminiumsubstrat) Dies entspricht realistischen Materialstärken beim Ersatz von Kupfer durch Aluminium. Wobei der Industrietrend sich zu noch dickeren Verbindern bewegt.

Die ermittelten elektrische Widerstände sind ähnlich im Vergleich zu den Benchmarkschweißungen mit den Standard CW Infrarotschweißprozess. Der Nanopulse ist bei 200W an seiner Leistungsgrenze.

## Grüne Strahlquelle

Im Berichtszeitraum wurde eine TRUMPF Laserquelle TruDisk Pulse mit 515nm Wellenlänge („grüne“ Strahlquelle) in ein Prototypenaufbau integriert, um erste Laserschweißversuche an Batteriezellen durchzuführen. Das grüne Laserlicht wird selbst in kaltem Zustand von Kupfer vielfach besser absorbiert als das der Infrarot Strahlquellen unserer Standardmaschinen, welche bei 1070nm emittieren. Auch der Nanopulse Laser aus den bisherigen Versuchen arbeitet mit 1070nm. Das kurzwelligere Licht erlaubt theoretisch eine sauberere Schweißverbindung als mit Infrarotstrahlquellen sowie eine stabilerer Prozessführung, da es nicht so leicht zu Einkoppelfehlern des Lasers in das Verbinder-Material kommt. Ebenfalls von Vorteil ist die Eigenschaft, dass ein Schweißprozess bei 515nm keine Mindesteinschweißtiefe bedingt wie bei der mikro-Keyhole Schweißverfahren unseres Standard-Schweißprozesses.

Folgend sind die Versuchsergebnisse aufgeführt, um Kupferverbinder auf der anspruchsvollsten Stelle der Batterieoberseite, dem Minus-Pol auf dem Bördelrand, zu kontaktieren. Dabei wurden 0,3 als auch 0,5 mm starke Kupferverbinder getestet. In Parameterstudien wurde die Leistung als auch die Vorschubgeschwindigkeit variiert. Weitere Parameter wie Wobble-Amplitude und -Frequenz wie beim Wobbleschweißen bzw. die Pulsform und -wiederholrate wie beim Nanopulse Schweißen, sind mit diesem Schweißprozess nicht nötig. Ausgewertet und optimiert wurde dabei:

- das Schweißverhalten mittels Schliffbildern, insbesondere der Einschweißtiefe in die Stahlhülle der Batteriezelle,
- Veränderungen an der empfindlichen Kunststoffdichtung der Batterie, welche sich direkt unter dem Bördelrand befindet,
- Spritzerbildung,
- Qualität der Schweißnaht
- und Anbindungsfläche zwischen Kupferverbinder und Stahlmantel der 21700 Batterie Rundzelle.

Besonders kritisch, neben der Einschweißtiefe die <100 µm betragen soll, sind Veränderungen an der Dichtung. Jede sichtbare Änderung an der Dichtung kann zum Erlöschen der Garantie durch den Zellhersteller als auch eine verringerte Dichtestabilität der Zelle bewirken.

Verbinder Dicke	Parametersatz	Einschweißtiefe in Batterie (Ziel<100 µm)	Einschätzung der Spritzerbildung	Beschädigung der Zelldichtung
0,3 mm	2	77 µm	Gut	Kein Schaden
0,5 mm	3	87 µm	Gut	Kein Schaden

*Tabelle 1: Überblick Schweißergebnisse der ermittelten Parametersätze für die Anbindung von 0,3 als auch 0,5 mm dickem Kupferverbinder auf dem Minuspol-Bördelrand einer 21700 Rundzelle.*

Die Ergebnisse der Parameteroptimierung hat schließlich sehr gute Schweißergebnisse in allen Bewertungskriterien ermöglicht (siehe Tabelle 1). Und dies sowohl für 0,3 als auch sehr dickem 0,5 mm starkem Kupfer (siehe Abbildung 5 und Abbildung 6).

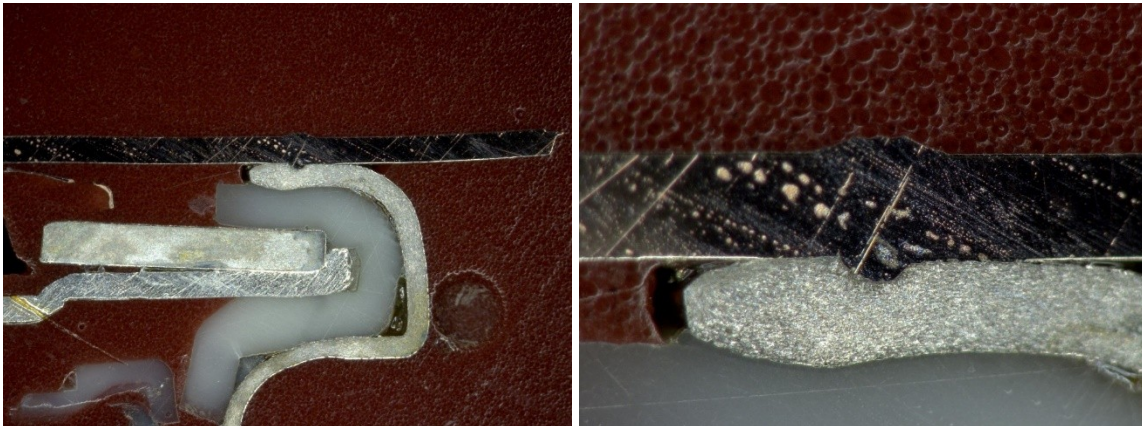


Abbildung 5: Schweißergebnisse mit grüner Strahlquelle von 0,3mm Kupferverbinder auf den Bördelrand einer 21700 Rundzelle als Schliffbild. Die Zeldichtung zeigt keine Beschädigungen und die Einschweißtiefe von 77 $\mu$ m entspricht den Anforderungen. Links: Übersicht. Rechts Vergrößerung.

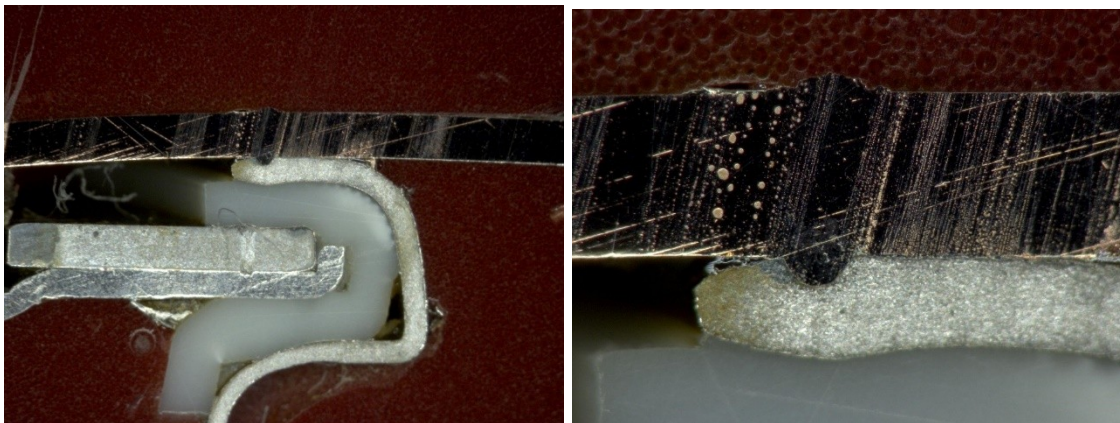


Abbildung 6: Schweißergebnisse mit grüner Strahlquelle von 0,5mm Kupferverbinder auf den Bördelrand einer 21700 Rundzelle als Schliffbild. Die Zeldichtung zeigt keine Beschädigungen und die Einschweißtiefe von 87  $\mu$ m entspricht den Anforderungen. Links: Übersicht. Rechts Vergrößerung.

Weitere Versuche konzentrierten sich darauf, Kupferverbinder auf dem Minuspol-Bördelrand einer 21700 Rundzelle zu schweißen. Dabei wurden sowohl 0,3 mm als auch 0,5 mm dicke Kupferverbinder getestet. Die Parameterstudien variierten die Leistung und die Vorschubgeschwindigkeit, während zusätzliche Parameter wie Wobble-Amplitude und -Frequenz oder die Pulsform und -wiederholrate nicht erforderlich waren.

#### Optimierte Parameter und Ergebnisse:

- **Schweißverhalten:** Die Schweißverbindungen wurden mittels Schliffbildern analysiert, wobei die Einschweißtiefe in die Stahlhülle der Batteriezelle besonders wichtig war. Die Ergebnisse zeigten, dass die Einschweißstiefen für beide Dicken unter 100  $\mu$ m lagen, was den Anforderungen entsprach.
- **Kunststoffdichtung:** Es wurden keine Veränderungen an der empfindlichen Kunststoffdichtung festgestellt, die sich direkt unter dem Bördelrand befindet. Dies ist entscheidend, da jede sichtbare Änderung die Garantie durch den Zellhersteller erlöschen lassen könnte.

- **Spritzerbildung:** Die Spritzerbildung war minimal und wurde als gut bewertet.
- **Qualität der Schweißnaht:** Die Schweißnähte waren qualitativ hochwertig, ohne Krater oder Spritzer.
- **Anbindungsfläche:** Die Anbindungsfläche zwischen Kupferverbinder und Stahlmantel war ausreichend groß, um eine stabile Verbindung zu gewährleisten.

#### Ergebnisse der Parameteroptimierung:

- **0,3 mm Kupferverbinder:** Einschweißtiefe weniger als 80  $\mu\text{m}$ , keine Beschädigung der Dichtung.
- **0,5 mm Kupferverbinder:** Einschweißtiefe von weniger als 90  $\mu\text{m}$ , keine Beschädigung der Dichtung.

#### Herausforderungen und Lösungen:

- **Anbindungsbreite:** Da die Anbindungsbreite bei diesem Schweißprozess wie erarbeitet kleiner ist als beim Wobble-Schweißprozess, wurde die Schweißgeometrie weiter angepasst. Die Nahtlänge wurde in Einzelsegmente aufgeteilt, um die Krümmung des Bördelrandes zu kompensieren.
- **Mehrfachschweißungen:** Um die Anbindungsfläche dennoch zu vergrößern, wurden mehrere parallel geführte Teil-Schweißlinien verwendet. Dies führte zunächst zu einer Wärmeakkumulation und einem teilweisen Aufschmelzen der Dichtung. Durch eine Verzögerungszeit von mindestens 100 ms zwischen den Schweißungen konnte dies jedoch vermieden werden.

Mit der grünen Strahlquelle konnten weiter gute Schweißergebnisse erzielt werden. Die Herausforderung besteht weiter, darin, die erforderliche größere Strahloptik in ein Produktiv-Laserbondsystem zu integrieren und zu industrialisieren, da in der aktuellen Generation der Laserbender noch nicht genug Platz dafür vorhanden ist.

Vergrößerung der Anbindungsbreite durch mehrfache Schweißnähte.

Prinzipiell ist die Anbindungsbreite bei diesem Schweißprozess kleiner als typischerweise mit dem Wobble-Schweißprozess möglich da die Schweißlinie nicht durch Oszillationen verbreitert wird. Daher wurde in folgenden Optimierungen die Schweißgeometrie und -strategie angepasst. Zunächst wurde die Nahtlänge in drei Einzelsegmente aufgeteilt, um die Krümmung des Bördelrandes zu kompensieren (siehe Abbildung 7).



Abbildung 7: Top Ansicht 21700 Rundzelle mit aufgeschweißtem, vernickeltem Cu Verbinder. Links: Die Schweißnahttraupe ist sehr gleichmäßig und zeigt keine Krater oder Spritzer, ist damit qualitativ sehr gut. Links: Der Verbinder wurde in einem Zugtest entfernt. Sichtbar sind nun die drei Verbindungszonen, deren Gesamtfläche  $0,8\text{mm}^2$  beträgt.

Im nächsten Schritt sollte die effektive Anbindungsfläche auf das Niveau des Referenz Wobble-Schweißprozesses gehoben werden, mit dem Ziel die volle Stromtragfähigkeit des Verbinders auszunutzen. Dabei galt es gleichzeitig das Dichtungsschmelzen zu Vermeiden. Dies konnte schließlich durch mehrere parallel geführte Teil-Schweißlinien erreicht werden. Jedoch führte dieses Mehrfachschweißen zu einer Wärmeakkumulation, welche doch das Schmelzen der Dichtung als Folge hatte (siehe Abbildung 8 links).

Nach durchlaufen einer weiteren Parameterstudie kamen wir zu dem Ergebnis, dass mit einer Verzögerungszeit von mindestens 100ms zwischen den Einzelschweißungen eine Verschweißung möglich war ohne ein stärkeres Aufschmelzen als mit einer Naht (siehe Abbildung 8 rechts). Diese gezielte Veränderung der Schweißparameter war nur mit dem neu entwickelten Schweißgeometrieditor möglich geworden.

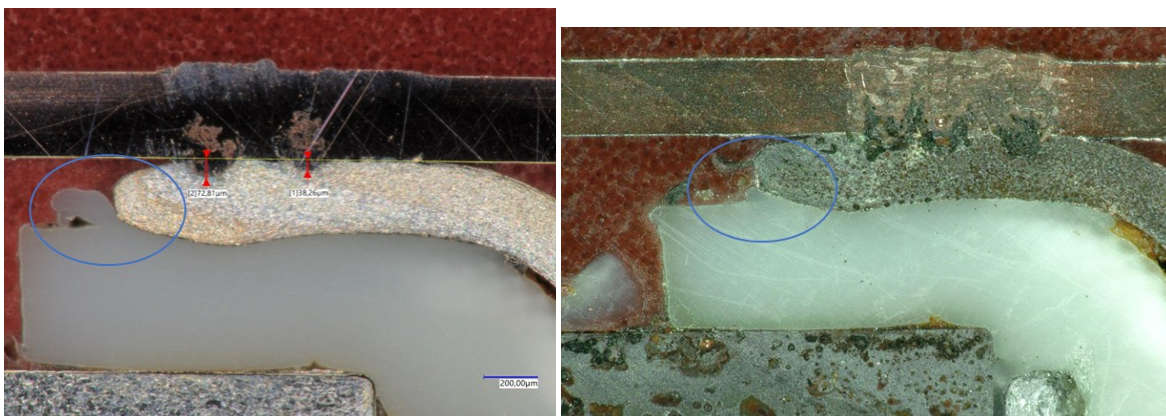


Abbildung 8: Schliffbilder der Schweißversuche aufeinanderfolgender Schweißungen zur Vergrößerung der Anbindungsfläche. Links: Zwei in direkter Folge durchgeführte Schweißungen erzeugen ein teilweises Aufschmelzen der Batteriedichtung (blaue Umrandung). Rechts: Selbst drei Schweißungen auf dem Batterierand erzeugen kein sichtbares Aufschmelzen, sofern die Pausenzeit zwischen den Schweißungen 100ms oder mehr beträgt.

Insgesamt konnten mit der grünen Strahlquelle exzellente Schweißergebnisse erzielt werden. Die Herausforderung wird sein die erforderlich größere Strahloptik in ein echtes Produktiv-Laserbondsystem zu integrieren und zu industrialisieren. In der aktuellen Generation unserer Laserbonder ist derzeit noch nicht genug Platz, um die erforderliche Strahloptik aufzunehmen.

## 2.1.1.2 AP 2.2 Prozessabsicherung durch Weiterentwicklung der Beobachtung von Prozesssignalen

Da im Gegensatz zum Ultraschallschweißen kein direkter Kontakt zur Prozessüberwachung von Laserschweißprozessen kann üblicherweise nur auf die Prozessemissionen des Schweißprozesses zurückgegriffen werden.

In diesem Arbeitspaket verfolgten wir den Ansatz auf innovative Art eine bisherig nur für Sicherheitszwecke verwendeten Schutzsensor im Laser für eine Echtzeit Prozessüberwachung zu verwenden.

Das bereits vorgestellte Konzept der Rückreflexbasierenden Prozessüberwachung wurde nun elektronisch-, sensor- und softwareseitig implementiert. Dabei spielen zahlreiche Komponenten das System zusammen. Ein Überblick der Komponenten und unten dargestellt.

Die bisher nur auf dem Lasercontrol Rechner verfügbaren Daten zu Laser-Ist-Leistung, Rückreflex und Laser-Soll-Leistung kann in direkt in der Bondersoftware dargestellt und in die Prozessdatenbak gespeichert werden.

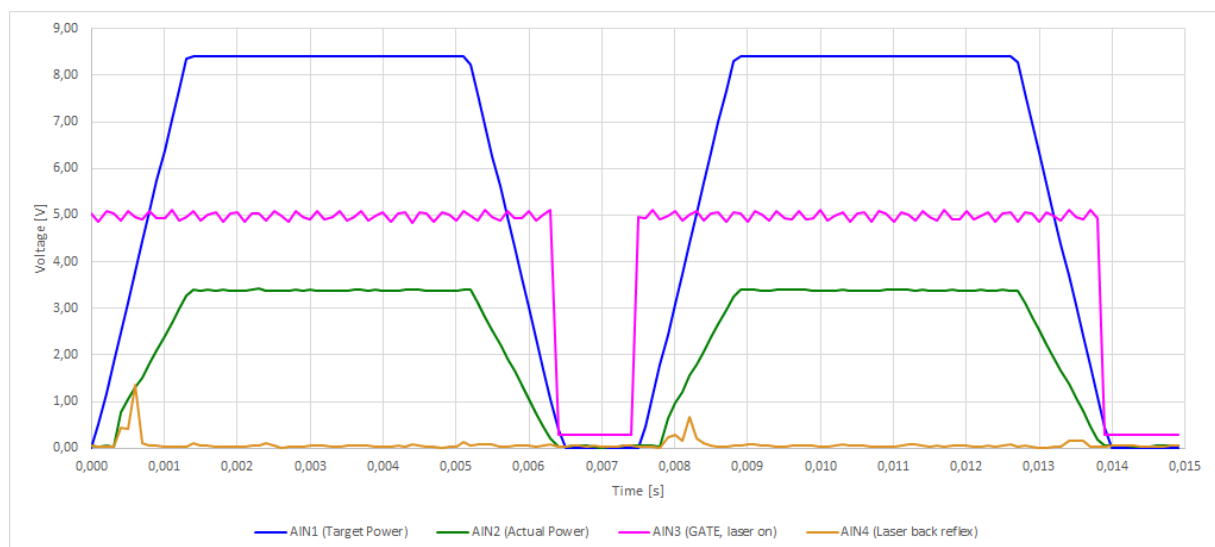
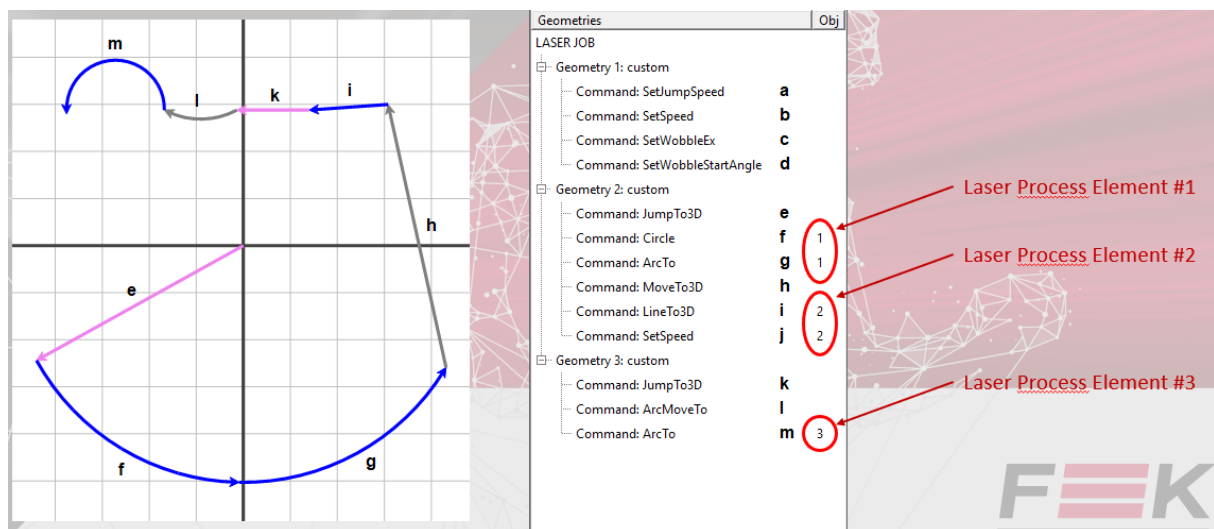


Abbildung 9: Nun in Prozessdatenbank aufgenommene Signale Blau: Analoger Leistungs-Sollwert; Grün: Tatsächlich gemessene Leistung; Magenta: Gate-Signal / LASER ON Signal; Orange: LASER Rückreflexsignal

Um das System entsprechend der Spezifikation konfigurieren zu können, sind entsprechende Parameterfelder implementiert, die sich folgendermaßen Gruppieren lassen:

- Kompilierte Sollwertdaten: Erwartete Weglänge, erwartete Schweißzeit und erwartete Anzahl der Elemente. Hier wird überprüft, ob die vom BondControl-Treiber erkannte Schweißnahtgeometrie unseren Erwartungen entspricht.
- Tatsächliche Laserleistung Schwellenwerte: Energiezufuhr, reale Schweißzeit, gemessene Anzahl der Elemente. Wir prüfen hier, ob die tatsächlich emittierte Laserleistung unseren Erwartungen entspricht.
- Laser-Rückenreflex Schwellenwerte und Filterparameter: Maximaler Reflex in der Startphase, durchschnittlicher Reflex in der mittleren Phase und maximaler Reflex in der mittleren Phase. Wir prüfen hier in verschiedenen Schweißphasen, ob der Laserrückreflex Schweißfehler anzeigt.

Eine Herausforderung an das System ist die Tatsache, das pro Schweißposition (Beispielsweise einer Batteriezelle) mehrere „Schweißjobs“, also getrennte Schweißlinien („Laserprozesseselement“ geschweißt werden können. ( siehe Beispiel unten)



Beispiel einer Abfolge von Schweißungen an einer Schweißposition

Hierbei musste das System in der Lage sein die getrennten Laserprozesseselemente korrekt identifizieren und die Überwachungsalgorithmen pro Element getrennt anwenden.

Für die Untersuchungen zum Verhalten der Prozessemissionen beim Schweißen von Hilumin, dem Handelsnamen für den typischer Weise verwendeten vernickelten Stahl der Batteriehülse, wurde in ersten Versuchen vorrangig die Detektion einer Durchschweißung und zweitrangig die thermischen Veränderungen der Kunststoffdichtung, dem wesentlichen Kriterium beim Schweißen auf dem Rand der Zelle, mit der bisher standardmäßigen Laserquelle untersucht. Ein Beispielbild einer durchschweiß-

ten Schulter einer Rundzelle ist in Abbildung 12 dargestellt. Die Prozessemissionen wurden mittels eines Laser Weld Monitoring Systems der Firma Precitec, als auch mit dem internen Rückreflex-Schutzsensor des Lasers, aufgezeichnet und verglichen.

Zur Untersuchung einer Veränderung der rückreflektierten Strahlung bei einer Durchschweißung im Fall einer einseitigen Zellkontaktierung wurde eine Leistungsvariation durchgeführt. Mit einem Parameterfenster beginnend bei erster Haftung bis hin zum Durchschweißen der Hüllenmaterials. Hierzu wurde statt einer echten Zelle ein Ersatzkörper aus Hilumin der Stärke 0,3 mm mit einer 0,5 mm dicken PTFE Folie als Isolator verwendet.

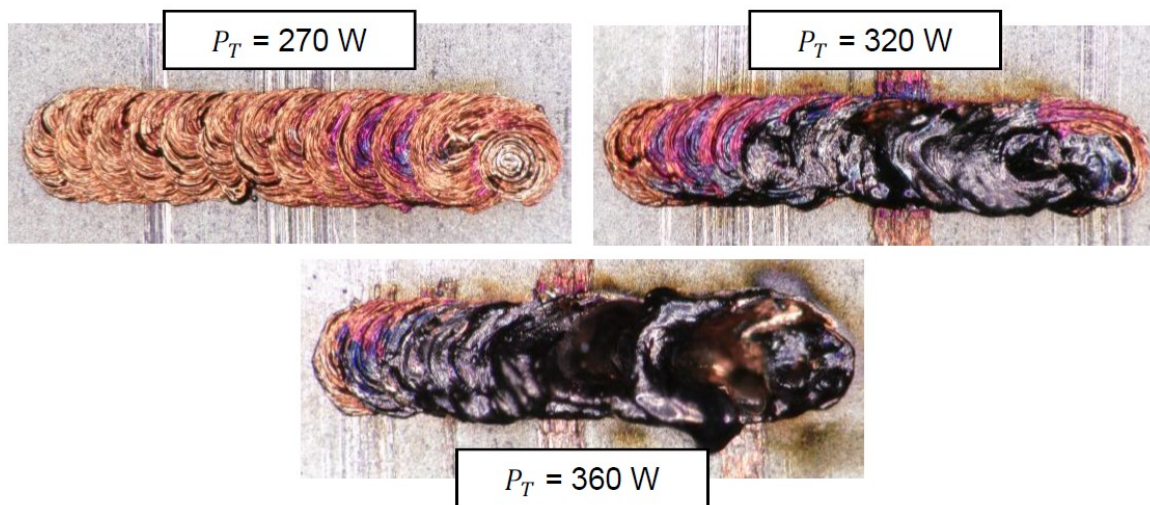


Abbildung 10 Veränderung der Schweißnahtoberfläche mit steigender Leistung anhand repräsentativer Mikroskopaufnahmen für die Leistungsstufen 270 W, 320 W und 360 W

Eine Analyse der Schweißnähte zeigte eine zunehmende Vermischung der Materialien mit steigender Leistung. Die Schweißungen der niedrigen Leistungsstufen wiesen einen hohen Anteil von Kupfer auf der Oberfläche der Naht auf. Ab einer Leistung von 310 W dominierte eine gräuliche Färbung die Schweißnahtoberfläche. Die regelmäßige durch die Strahloszillation entstehende Struktur wurde insbesondere gegen Nahtende von einer Stahl-Kupfer-Mischung überdeckt. Mit weiter steigendem Energieeintrag stieg die Anzahl der Nahtfehler durch vermehrte Auswürfe. Die Schweißungen bei 360 W zeigten partielle Durchschweißung des Hiluminblechs.

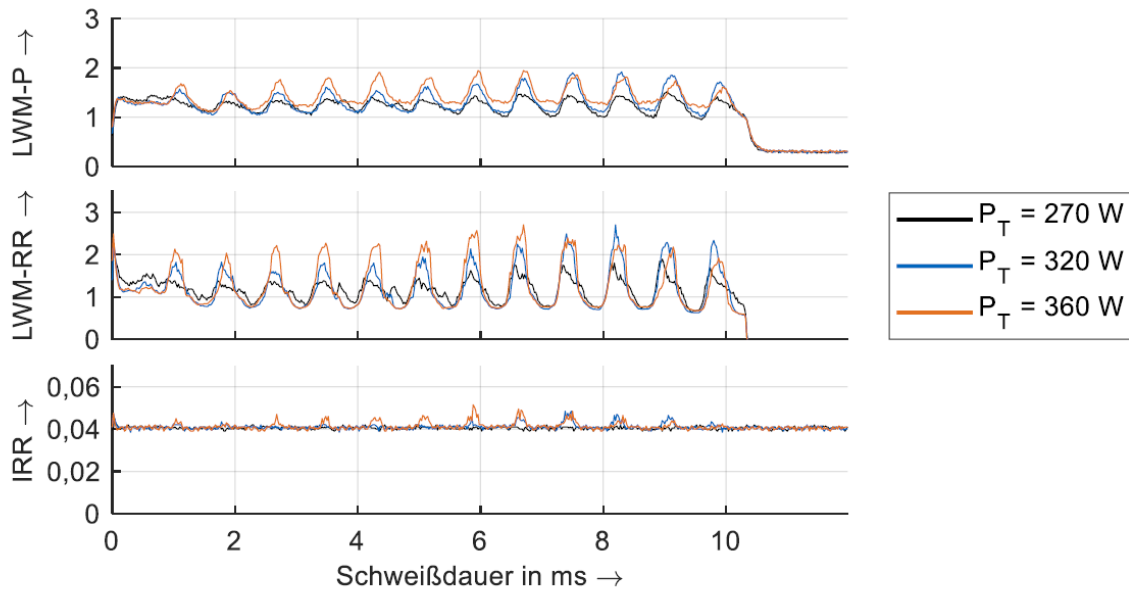


Abbildung 11 Signalverläufe für drei exemplarische Leistungsstufen 270 W, 320 W und 360 W

Eine Analyse der in Abbildung 11 dargestellten Signalverläufe für die betrachteten Leistungsstufen zeigte, dass der Zusammenhang zwischen der Leistung und der Signalhöhe sowie der Durchschweißungen bisher nur bedingt direkt erkennbar sind.

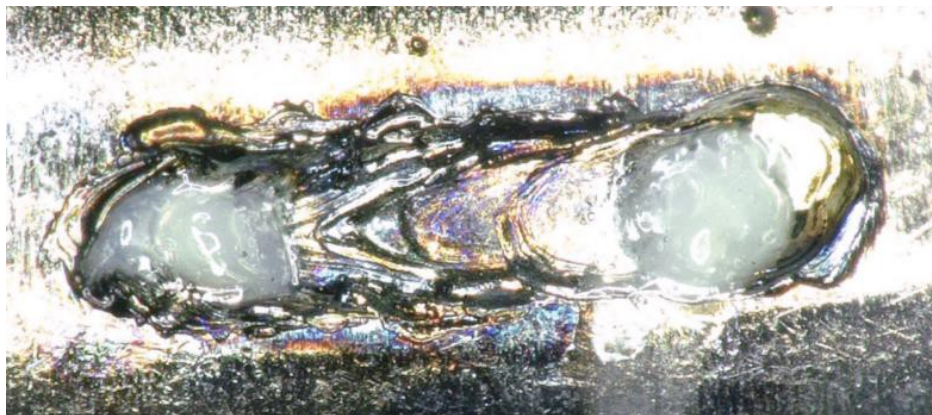


Abbildung 12 Mikroskopaufnahme einer Schweißnaht ohne Bändchenmaterial auf den Rand der Zelle; weiße Flächen: aufgeschmolzener Kunststoff der Zelle

Weiter konnte erfolgreich ein Zusammenhang aus den LWM und den internen Signalen abgeleitet werden (siehe Abbildung 13), welche es erlauben kann bestimmte Fehler während des Schweißens zu detektieren.

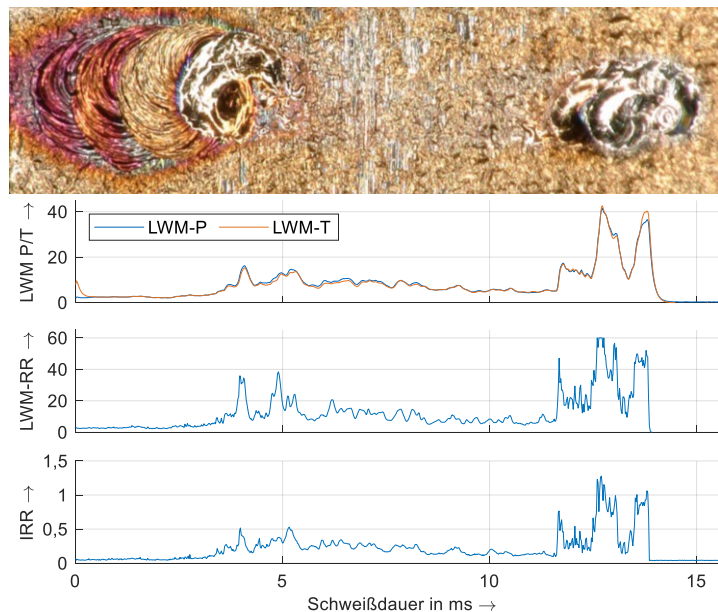


Abbildung 13 oben Schweißbild eine unvollständige Schweißung auf Kupfer. Darunter Signalverläufe des kommerziellen LWM (Laser Weld Monitoring) Systems von der Firma Precitec. Unten: (IRR) Signalverlauf des Laserinternen Sicherheits-sensors IRR (Interner Rückreflex Sensor). Dies zeigt, dass der interne Sensor auch für eine Prozessüberwachung denkbar ist. Die Startphase der Schweißung wurde bereits ausgeblendet.

- Kompilierte Sollwertdaten: Erwartete Weglänge, erwartete Schweißzeit und erwartete Anzahl der Elemente. Hier wird überprüft, ob die vom BondControl-Treiber erkannte Schweißnahtgeometrie unseren Erwartungen entspricht.
- Tatsächliche Laserleistung Schwellenwerte: Energiezufuhr, reale Schweißzeit, gemessene Anzahl der Elemente. Wir prüfen hier, ob die tatsächlich emittierte Laserleistung unseren Erwartungen entspricht.
- Laser-Rückenreflex Schwellenwerte und Filterparameter: Maximaler Reflex in der Startphase, durchschnittlicher Reflex in der mittleren Phase und maximaler Reflex in der mittleren Phase. Wir prüfen hier in verschiedenen Schweißphasen, ob der Laserrückreflex Schweißfehler anzeigt.

Weiter konnte die berichtete echtzeitfähige Prozessüberwachung mittels Precitec LWM als auch die integrierte Rückreflexüberwachung getestet werden. Die Abschlusstests wurden bestanden und die die Entwicklung dieser Komponenten kann als abgeschlossen betrachtet werden. Voraussetzung für den industriellen Einsatz der Echtzeitüberwachung wird die kommende Laserbonder Maschinengeneration 6.2 sein.

### 2.1.1.3 AP 2.3 Automatisierte Auswertung der Bondqualität und Rückschluss auf Haltbarkeit

Im Berichtszeitraum wurde die Spezifikation für die algorithmische Auswertung des Rückreflexsignals formuliert. Diese umfasst die jeweiligen Parameter für die Signalaufbereitung als auch die Schwellenwerte für das Auslösen einer „nicht in Ordnung“, (n.i.O.) Meldung an das Steuerungssystem des Bonders für bestimmte, definierte Fehlerszenarien.

Für jeden Laser Prozess (Entspricht den Laseraktivitäten bei einem Bondpunkt = eine Anfahrt mit dem Tool) soll die Überwachung individuell programmierbar sein, die Grenzen und die Einstellungen werden vor dem Bondpunkt an den Laser-PC übertragen. Für jeden Bondpunkt soll es eine individuelle Kennung zur Rückverfolgung geben. Der Laser-PC prüft sofort und meldet das Ergebnis an Schnittstelle der BondProcess Steuerung. Wenn OK gemeldet wird, macht der Laserbender weiter, die Ergebnisse und die dazugehörigen Kurven werden an den Boder und in die Datenbank übertragen.

Um die Signale korrekt auszuwerten und klassifizieren zu können, wird das Rückreflexsignal den Spezifikationen entsprechend segmentiert und analysiert.

Wenn die tatsächlich abgegebene, gemessene Laserleistung über den oberen Schwellenwert ansteigt, beginnt die Segmentierung. Start (oder Fortsetzung) der Integration der Laserleistung in Energie, Start (oder Fortsetzung) der Messung der tatsächlichen Schweißzeit und Erhöhen der gemessenen Anzahl von Elementen. Wenn die tatsächliche Laserleistung unter den unteren Schwellenwert fällt, stoppen wir diese drei Aktionen.

Die Überwachung der Laserleistung ermöglicht es uns zu kontrollieren, ob wir tatsächlich etwas geschweißt haben und ob das geschweißte Objekt die richtigen Abmessungen (Zeit, Energie) hat.

Für jedes Laserprozesselement definieren wir 3 Phasen: Start, Mitte (oder nach dem Start) und Ende. Der Beginn und das Ende eines Laserprozesselements wird durch das Gate-Signal definiert. Für die Startphase überwachen wir den maximalen Rückreflex. Und für die mittlere Phase werden der maximale und der durchschnittliche Rückreflex überwacht. Wegen des Rauschens wenden wir einen Medianfilter auf den Rückreflex an, gefolgt von einem Mittelwertfilter, bevor wir die drei Schwellenwerte auswerten.

Die automatische Bondqualitätsüberwachung wurde damit in die Maschinensoftware integriert. Um die Auswirkungen der Prozessüberwachung im Hinblick auf die Haltbarkeit auswerten zu können wurden Testschweißungen unter anderem von Aluminium auf Batterierundzellen angefertigt. Diese im Überwachungssystem als gut gekennzeichneten Schweißungen wurden vom Projektpartner Fraunhofer ISE in Langzeit Alterungstests geprüft.

Dabei haben sich keine wesentlichen Alterungserscheinungen gezeigt, obwohl die Metallurgischen Bedingungen dies prognostizierten. Die Mischverbindungen und Intermetallischen Phasen von Aluminium und Eisen (Stahl) neigen prinzipiell zu Spröd- und Kaltrissen. Damit sind die Ergebnisse als sehr gut zu bewerten, da die Langzeittauglichkeit immer ein großer Hinderungsgrund für den Industriellen Einsatz darstellte. Für eine genauere Haltbarkeitsprognose sind jedoch Langzeitstudien in realen Produktivumgebungen sinnvoll.

#### 2.1.1.4 AP 2.4 Weiterentwicklung der einseitigen Kontaktierung von verschiedenen Batteriezelltypen

Die einseitige Kontaktierung der Batteriezelle soll idealerweise nur durch einmaliges Anfahren der Zelle mit dem Niederhalter des Laserschweißkopfes (Bondkopf) realisiert werden, um die Prozesszeit der Maschine zu minimieren. Dabei wurden folgende Hauptherausforderungen identifiziert: Das Kontaktieren von Plus- und Minuspol der Batteriezelle benötigt zwei individuelle Schweißungen was stark vom bisherigen Prozessablauf abweicht und grundlegende Änderung softwareseitig in der Programmierung und Ansteuerung der Maschine erfordert. Weiter erlaubt die bisherige Maschinensteuerung nur Linien- und Kreisgeometrien mit eingeschränkter Parametrisierung (siehe Abbildung 14). Um aber die Batterierundzellen und insbesondere den Schulterrand des Minuspols zuverlässig kontaktieren zu können muss die Schweißnaht z.B. genau dem Schulterverlauf folgen können. Zudem muss für Pluspol und Schulter (Minuspol) in unterschiedlicher Fokuslagenhöhe geschweißt werden. Auch dies war in der bisherigen Maschinensteuerung nicht vorgesehen.

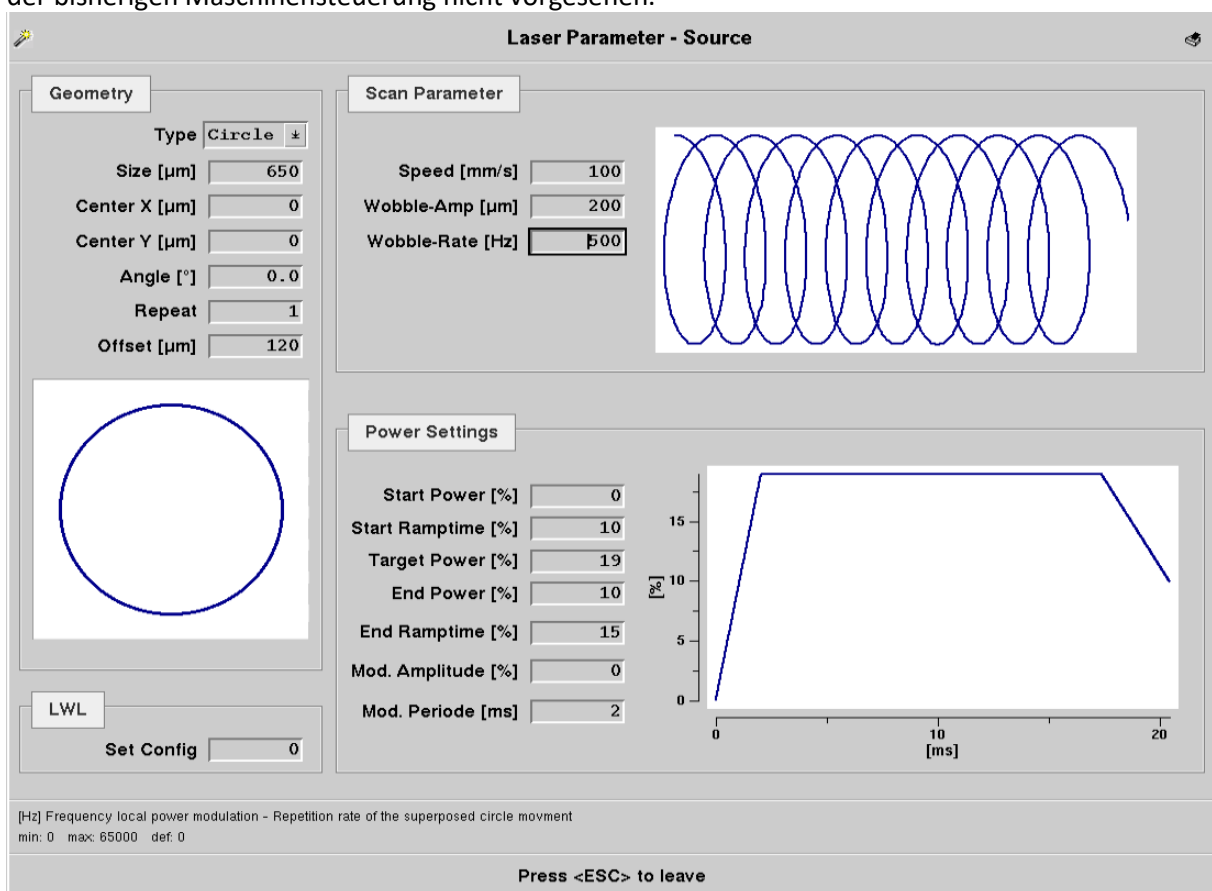


Abbildung 14 bisherige Steuerung der Laserschweißjobs. Es kann zwischen Kreis- und Liniengeometrie sowie Wiederholungen dieser gewählt werden sowie eingeschränkt der zeitliche Leistungsverlauf sowie die Wobble Parameter des Laserscanners.

Daher wird innerhalb des Projektes eine stark erweiterte Programmierbarkeit der Schweißgeometrien die genau auf die Bedürfnisse des Batterieschweißens abgestimmt ist, entwickelt. Ein Überblick über das Bedienerinterface ist in Abbildung 15 dargestellt.

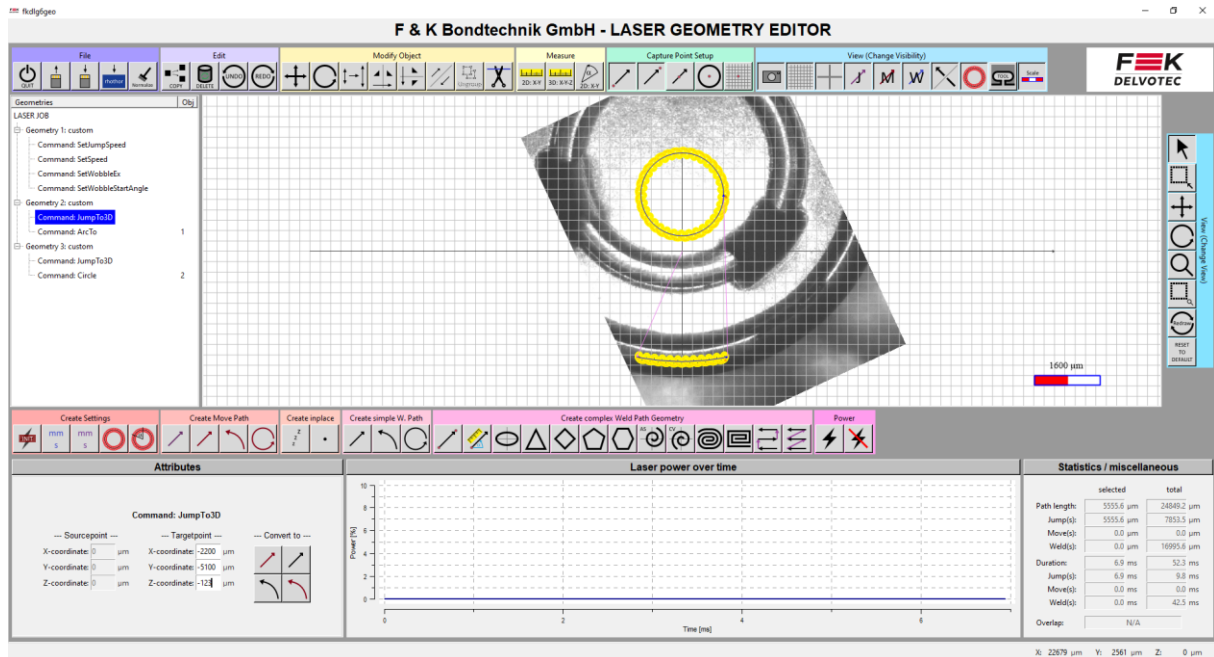


Abbildung 15 Screenshot der Steuerungssoftware zur freien Programmierung der „Laser Geometry Editor. Einblendbar sind nun die der zu schweißenden Geometrien direkt auf dem Produkt, in diesem Beispiel der zentrale Pluspolbereich und die Schalter der Batterierundzelle mit jeweiliger Schweißgeometrie (gelb).

Diese Prozesssteuerung soll in der Endfassung folgende neuen Features erfüllen können:

- Mehrere individuell einstellbarer Schweißgeometrien (Schweißjobs) per Bondposition
- Genaue Kontrolle über Timing und Pausen während und zwischen den Schweißjobs, um die thermischen Einflüsse auf die Zelle kontrollieren zu können.
- Freie Programmierbarkeit und Positionierung der Schweißgeometrien in x,y und z
- Einbeziehung und Visualisierung der „Toolöffnung“ um auch speziell geformte Niederhalter, welche genau an individuell Batteriemodule angepasst sein können. Dies ist erforderlich um die Zugänglichkeit des Laserstrahls zu maximieren aber die Kontaktpunkte auf Modulgeometrie hin zu optimieren. (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**)
- Genauere Kontrolle und Visualisierung der individuellen Strahltrajektorien samt Laseroszillation (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** und **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**) sowie der Laserleistungsrampen pro Schweißjob.
- Inline-Errechnung der auftretenden Leistungen sowie Energiemengen sowie diverser geometrischer Kennzahlen wie dem Überlappungsgrad der Wobble-Trajektorie, abhängig von Parametern wie Frequenz, Amplitude und Vorschubgeschwindigkeit (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**).
- Generell volles Ausnutzen der zur Verfügung stehenden Steuermöglichkeiten der Scannertreiber. Diese sollen im späteren reduziert werden, um eine einfache Programmierung der Schweißgeometrien zu ermöglichen was fehlerhafte Programmierung der Schweißgeometrien vermeiden helfen wird.

Die im Projekt gestartete Programmierbarkeit der Schweißgeometrien „Laser Geometrieditor“ die genau auf die Bedürfnisse des Batterieschweißens abgestimmt ist, wurde weiterentwickelt.

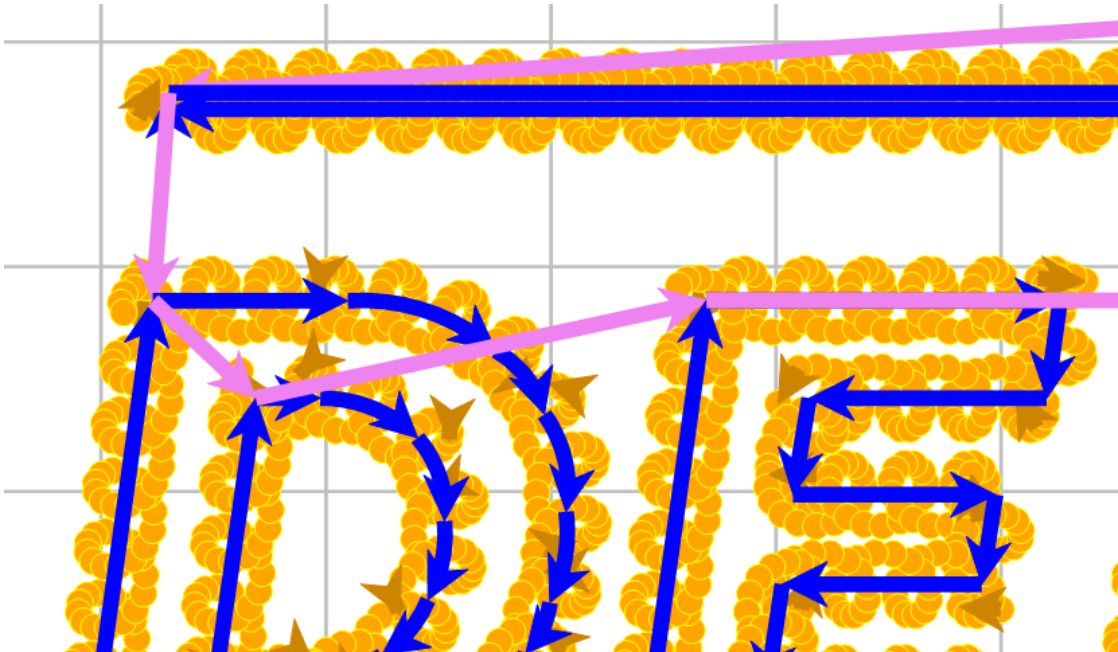


Abbildung 16: Beispielhafte Schweißgeometrie mit mehreren Schweißjobs mit frei gestaltbaren Schweißbahnen. Unten: Vergrößerter Bereich des Geometrieditors. Sichtbar ist nicht nur eine schematische Visualisierung, sondern auch die Struktur mit Wobble Trajektorie und zu erwartender Schweißbadzone.



Abbildung 17 Erste erfolgreiche Schweißtests mit Ansteuerung der Scannerspiegel durch den Geometrieeditor. Infrarotlaser auf Aluminiumplatte, hier ohne Wobble.

## Wobble Amplituden Korrektur

Der Wobble, also die zusätzliche, mit der Bahnkurve überlagerte, Oszillation des Laserfokus ist wesentlicher Bestandteil unseres Mikroschweißprozesses. Dabei ist wesentlich, wie die einzelnen Schlaufen der Oszillationen ineinandergreifen (Überlapp) oder sich überlagern (siehe Abbildung unten). Dabei können kleine Variationen der Parameter zu grundsätzlich anderen Erscheinungsbildern führen gezeigt in Abbildung unten links das gewünschte Erscheinungsbild. Die senkrecht zur Bahnkurve verlaufenden Bahnteile haben einen gleichmäßigen Abstand. Links in der Abbildung: hier zeigen die Schlaufen eine Überlappung bzw. ein Aufeinanderliegen der senkrechten Bahnteile. In diesem Fall werden als Folge bestimmte Positionen zweimal geschweißt mit einer Lücke dazwischen. Um für die Parameteroptimierung bei einer Schweißaufgabe Justagen vornehmen zu können ist es wichtig, dass diese Bahnkurve erhalten bleibt und mit der angezeigten übereinstimmt, da sich sonst die Schweißcharakteristik stark ändern kann.

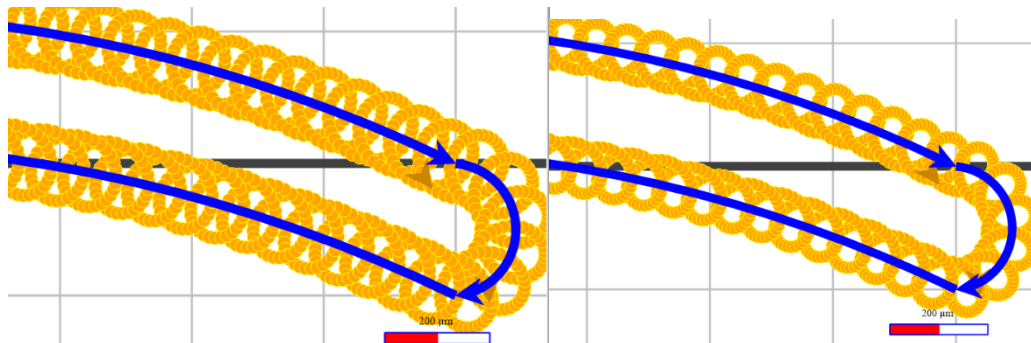


Abbildung 18 Direkte Visualisierung unterschiedlicher Wobble Parameter (Vorschub, Frequenz, Amplitude). Links:  $F=800\text{Hz}$ ,  $A=130\mu\text{m}$  Rechts:  $F=800\text{Hz}$ ,  $A=100\mu\text{m}$ . Direkt sichtbar wird unter anderem der veränderte Grad der Überlappung der einzelnen Schlingen.

Es existiert jedoch das Phänomen, das sich die galvanisch angetriebenen Spiegel ab einer bestimmten cutoff Frequenz nicht mehr der vorgegebenen Oszillation Amplitude folgen können (siehe Abbildung unten). Ab dieser Cut-off Frequenz sinkt die Real-Amplitude gegeben gegenüber der vorgegebenen. Diese wird in praktischen Schweißaufgaben schnell erreicht.

Daher wurde es als notwendig identifiziert diesem Einbruch der Oszillation entgegenzuwirken. Theoretisch folgt der Einbruch der Oszillation dem eines Dämpfungsterms.

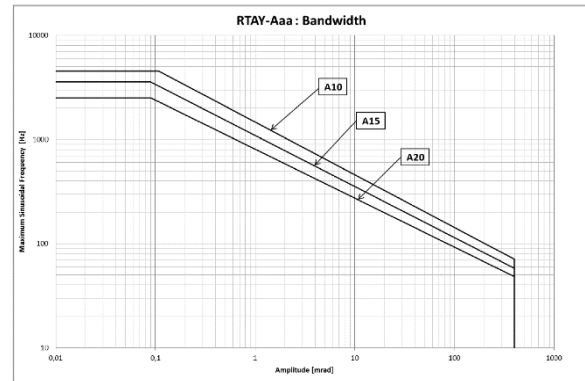
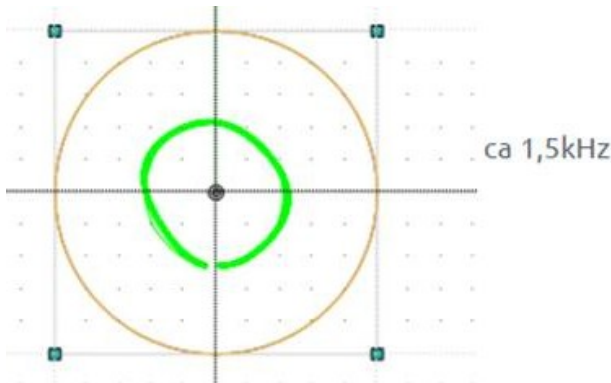


Abbildung 19 Links: Berechnete Real-Amplitude des Wobbles (grün) im Vergleich zur kommandierten Soll-Amplitude von  $150\mu\text{m}$  (orange) bei  $1,5\text{kHz}$ . Um die eigewünschte Soll-Amplitude zu erreichen, muss die Amplitude entsprechend größer gewählt werden. Links: Einbruch der Maximal mögliche Amplitude mit steigender Oszillationsfrequenz

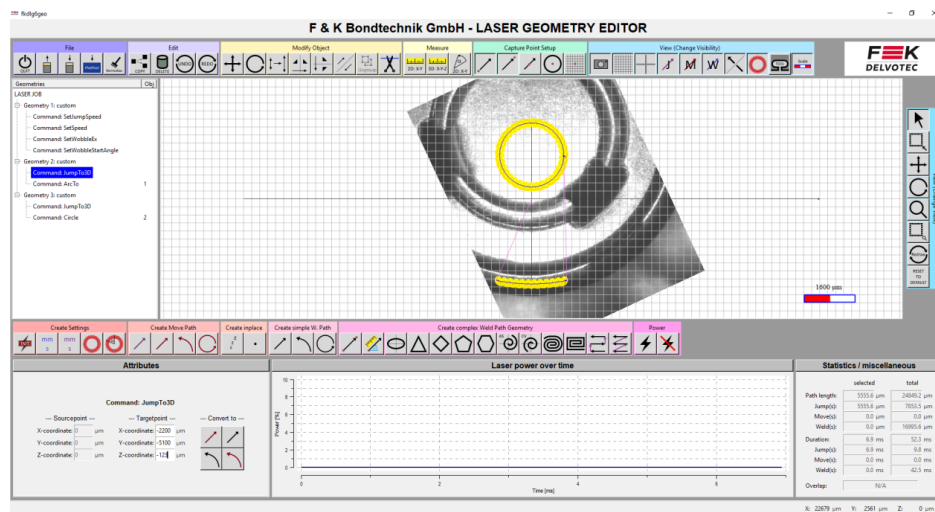


Abbildung 20 Screenshot der in der Entwicklung befindlichen Steuerungssoftware zur freien Programmierung der „Laser Geometrie Editor“. In diesem Beispiel der zentrale Pluspolbereich und die Schulter der Batterierundzelle mit jeweiliger Schweißgeometrie (gelb).

Diese wurde als Kalibrationsfunktion in die Bondersoftware als Option testweise integriert.

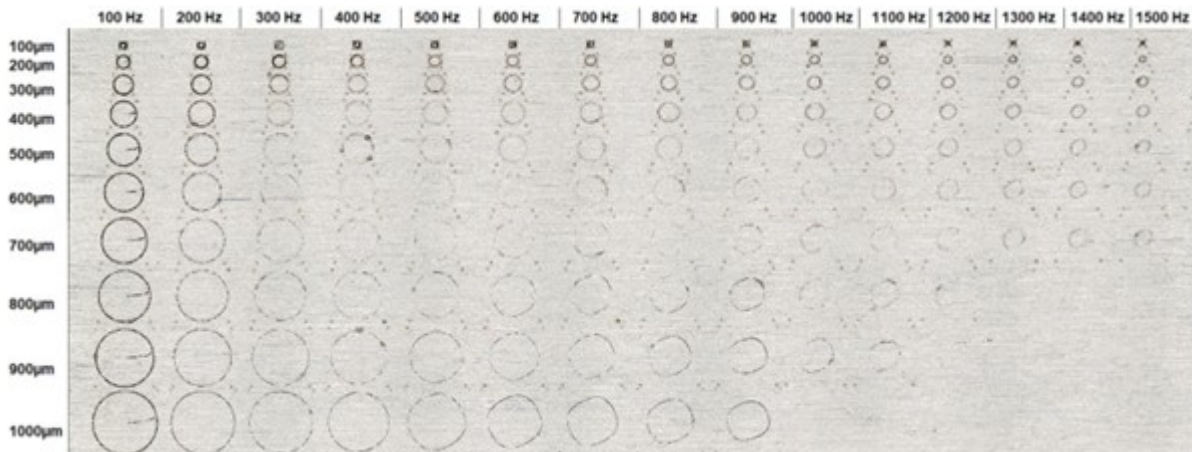


Abbildung 21 Kennfeld mit Amplituden und Frequenzabhängigen, realen wobble Amplituden

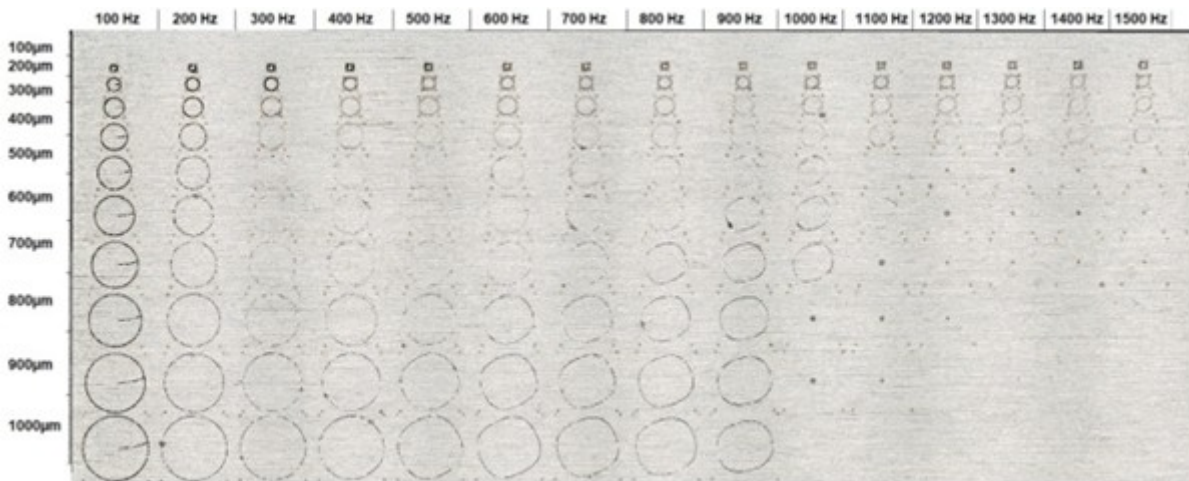


Abbildung 22 Mit Kalibration korrigierte Parameter geschweißtes Parameterfeld.

Bei den statischen Wobblen geht man von zirkularen, also kreisförmigen Wobblen aus (Phase = 90°). Bei den Wobblerradien geht man davon aus, dass paralleler Radius und senkrechter Radius (zur Pfadrichtung) gleich groß sind (siehe **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). Die Vorschubgeschwindigkeit hat bei typischen gebräuchlichen Werten noch keine nennenswerte Verzerrung der Amplitude verursacht. Daher geht jedoch die Allgemeine Vorschubgeschwindigkeit noch nicht in die Kalibrierung mit ein.

Die Arbeiten am Laser Schweißgeometrieeditor konnten abgeschlossen werden. Mit der Versionsnummer 0.0.1.758 wurde dieser intern Freigegeben.

Strömungssimulationen

Im Verlauf der Bearbeitung des Arbeitspaketes AP 3.3 der Prozessoptimierung zur einseitigen Kontaktierung von Batteriezellen hatte sich ein neuer Haupteinflussfaktor für einen stabilen Fügeprozess auf der Batteriezelle herausgestellt. Die Strömungsdynamik des Spülgases um die Fügestelle hat großen Einfluss auf eine z.B. vollständige Schweißnaht und einen stabilen Prozessverlauf. Diese Strömungsdynamik wird wesentlich durch die Geometrie des LaserTools bestimmt. Um dieses nun so zu gestalten, dass es nicht zu unvorhergesehenen Effekten und Verschlechterungen kommt insbesondere bei der einseitigen Kontaktierung, hatte sich unserer Ansicht nach die Notwendigkeit ergeben, eine externe Dienstleistung heranzuziehen um im weiteren Projektverlauf eigenständig Simulationen zur Strömung im LaserTool zu ermöglichen.

Der Antrag auf Mittelumwidmung für diese Strömungssimulationen wurde gestellt und genehmigt.

Im Haus werden bisher bereits erfolgreich FEM Simulationen eingesetzt um die Transducer für unsere Ultraschallbender zu simulieren und zu optimieren, bevor es überhaupt in den Prototypenbau übergeht. Die Strömungssimulation unterscheidet sich jedoch signifikant von den Schwingungsmoden Analysen, die bei uns bisher durchgeführt werden. Durch die Externe Dienstleistung wird ein bisheriges Tooldesign simuliert und mit den realen Ergebnissen verglichen und abgestimmt, als zweites Teil des Dienstleistungspaketes wird unsere Mitarbeit in die Lager versetzt weitere Simulationen für neue, optimierte LaserTools für die Batterieherstellung wie sie im Projekt geplant ist, zu designen.

Durch diese Simulationen können wir weit effizienter diese LaserTools designen was potentiell Einsparungen an Material, Fertigungskosten und Mannstunden zur Folge hat.

Konkret haben sich die folgenden kritischen Fragestellungen ergeben, die im Ursprungsantrag noch nicht berücksichtigt werden konnten:

- Neben dem Nullspalt hat sich die Prozessgas bzw. Spülgasströmung an der Fügezone als Haupteinflussfaktor herausgestellt. Dieser Effekt wurde in Dauertests beobachtet und hatte Schweißabbrüche zur Folge, welche sich durch Schmauch erklären lassen, welcher nicht aus dem Tool geblasen wird.
- Höhere Strömungsgeschwindigkeiten beim Crossjet an der Tool Oberkante (dieser wird benötigt für den Schutz der Optik vor Metallspritzern) hat starken Einfluss auf diese Schweißabbrüche gezeigt, eine neue Einspüldüse hatte jedoch einen gegenteiligen Effekt bewirkt.
- Das Design und die Anordnung der Einspritzdüsen als auch die Position der Auslassöffnungen lassen sich nur mit hohem Material, Geld, Zeit und Personalaufwand praktisch realisieren.

Zielsetzung der Simulationsbasierten Analysen ist die Ermittlung der Verteilung des eingedüsten Stickstoffs, insbesondere des Massenstromes in der Fügezone.

## Vorgehensweise

Ausgangspunkt ist die Solid Works Geometrie des LaserTools unserer Desinger. Das LaserTool besteht aus 2 Bauteilen: dem Cutter und dem Träger. Mithilfe des blauen Rohres wird der Stickstoff an die Düse geführt. Zusätzlich wird Luft durch eine Düse geführt

Dieses Modell wird aufbereitet, um von der Simulationssoftware verarbeitet werden zu können. Dazu muss das Strömungsvolumen erzeugt werden und u.A. werden kleine Spalte und Absätze geschlossen bzw. vereinfacht um die Komplexität so weit sinnvoll zu vereinfachen. Das schließliche Rechengebiet besteht aus einem Fluidvolumen, dass sich sowohl im inneren Bereich des Gebildes als auch umhüllend um das Bauteil befindet. Dabei ist zu bemerken, dass die Komplexität des LaserTools durch die Vielzahl an Öffnungen, Kanten und Winkeln trotz der relativ kleinen Größe ausgesprochen hoch ist, höher als beispielsweise die einer Tragfläche. Diese neu angepasste Geometrie wird mittels Fluent Meshing in eine volumetrische Geometrie wird etwa 10 Millionen Elementen diskretisiert. Dies ist kein vollautomatischer Prozess, sondern muss individuell bearbeitet werden um die Simulationsergebnisse nicht zu verfälschen. Unter anderem werden die Grenzregionen wahlweise mit Polyeder- oder Prismenschichten von abgestimmter Dicke versehen. Ergebnis ist ein 3D-CFD (Computational fluid dynamics) Simulationsmodell.

Für dieses Modell wurden nun die Randbedingungen definiert. In unserem Speziellen Fall haben wir zwei unterschiedliche Fluide die das Bauteil durch insgesamt fünf unterschiedliche Rohrzuflührungen Durchströmen: Stickstoff und Umgebungsluft mit ca.10 L/min. Weiter werden die Wände zunächst hydraulisch glatt und mit einer no-slip Randbedingung modelliert. Also weitere Voraussetzung wurde zur Vereinfachung eine stationäre, isotherme und einphasige Modellierung der Strömung vorgenommen, die im ersten Schritt das Laserschweißen und die Rauchentwicklung noch nicht abbildet. Das mathematische Simulationsmodell („Solver“) beruhte dabei auf dem k-Omega SST-Ansatz welcher prädestiniert für turbulente Strömungen ist.

Zielsetzung der Simulationsbasierten Analysen ist die Ermittlung der Verteilung des eingedüsten Stickstoffs, insbesondere des Massenstromes in der Fügezone. Dabei wurden als Ergebnisgrößen die Massenstromverteilung zwischen dem inneren Bereich des Lasertools und der Umgebung, der Volumenanteil des Stickstoffs zwischen dem inneren Bereich des Lasertools und der Umgebung, die Geschwindigkeitsprofile und Stromlinien sowie die resultierende Druckverteilung betrachtet.

Als Konvergenz- und Plausibilitätskriterien für die stationäre Strömungsanalyse diente eine Betrachtung von Residuen sowie der Massenstromdifferenzen über vier Einlassflächen und drei Auslassflächen als Monitorgrößen im Verlauf der Simulationsiterationen. Diese Phase wurde wiederholt durchlaufen und bei Nichterfüllung der Kriterien das Finite-Elemente-Netz gezielt optimiert. Schließlich zeigte sich nach etwa 200 Iterationen bereits ein resultierender Summenmassenfluss von weniger als  $8 \cdot 10^{-5}$  kg/s dennoch muss die Simulation fortgesetzt werden um Sprünge in den Residuen auszuschließen und bis das Schwanken des Massenstroms unter  $0,5 \cdot 10^{-5}$  kg/s fällt. Damit

kann ein stabiler Gleichgewichtszustand angenommen werden und es ist keine transiente Lösung erforderlich. Schließlich können die Mittelwerte der beobachteten Größen ausgewertet werden, insbesondere das Vektorfeld der Geschwindigkeit.

Unten dargestellt nun beispielhaft die Strömungsverhalten an der Toolspitze des bisherigen Standard LaserTools sowie an der Schutzgaseinspülung.

Die Strömung im Bereich der Toolspitze nahe der Schweißzone konzentriert sich hauptsächlich in der Mitte des Toolkanals und bestätigt damit bisherige Erfahrungen. Damit ist nun bekannt welches Verhalten die nächsten Generationen der LaserTools aufweisen müssen um mindestens gleichleibende Schweißumgebungen zu erzeugen.

Das Verhalten nahe der Schutzgaseinspülung ist wichtig um die Wirkung als Schweißpartikel ablenkenden Crossjet, welcher wichtig ist um die Laseroptik vor Verschmutzung und Beschädigung zu schützen, zu optimieren. Als erstes Ergebnis konnte hier festgestellt werden das ein erheblicher Teil des Schutzgases in die untere Zone des LaserTools gelenkt wurde und sich mit dem Stickstoff, welcher als Prozessgas benötigt wird, vermischt hat. Basierend auf diesen Erkenntnissen wurde bereits ein Neudesign des Crossjets eingeleitet. Weiter zeigte sich das der oben eingeleitete Stickstoff größtenteils über den Spalt Tool-Messerhalter in den freien Raum entweicht und dementsprechend eher weniger zur Spülung bei trägt.

Schließlich konnten sowie neue Tool Prototypen zur Batteriekontaktierung erstellt simuliert und verwirklicht werden, welches die Erkenntnisse der Simulationen umgesetzt hat. Darunter:

- der verbesserte Crossjet, um mit geringerem Druckluftverbrauch gleichzeitig eine höhere Lebensdauer des Schutzglases zu ermöglichen, was sich direkt positiv auf die Energie- und Betriebskosten des Systems auswirken wird,
- optimierte Einspüldüsen, um Schmauchansammlung im Tool zu vermeiden welcher sich mit resultierenden Schweißabbrüchen oder unvollständigen Schweißnähten bemerkbar machen würde
- und eine symmetrische Auslassanordnung, welche einen Schweißspritzeraustritt und somit Produktkontaminationen effektiv verhindern kann.

Ein wesentlicher Aspekt bei dem Design sind die ringförmigen und symmetrischen Auslassöffnungen für das Spülgas. Diese sind so geformt und angeordnet, dass sie im Prinzip das Austreten von Schweißspritzern mittels eines Labyrinth-Effektes vollständig verhindern soll. Das Vermeiden von solchen Spritzen ist hochgradig relevant für alle unseren Kunden in der Batteriemodul-, als auch in der Leistungselektronikfertigung. Die gestiegene Komplexität dieser Geometrie im Vergleich zu bisherigen Tools ist es nun jedoch, was bislang die erfolgreiche Erstellung eines effektiven Simulationsmodells verhinderte.

Hintergrund ist, dass die Volumenelemente eines Simulationsmodells in der Fluidynamik unter anderem gewisse Randbedingungen hinreichend erfüllen müssen, um stabile und damit verwertbare Lösungen zu erzeugen:

- Eine hohe Orthogonalität der Elementwinkel,
- gering bzw. definiert anwachsendes Volumenverhältnis der Elemente nahe den relevanten Oberflächen und benachbarter Elemente,

- eine sinnvolle Stromlinienorientierung der Elemente, dh. die Geschwindigkeitsvektoren sollen möglichst senkrecht auf den Netzflächen stehen,
- und die Vermeidung von extremen Seitenverhältnissen der Elemente, diese dürfen also nicht zu flach oder linienförmig ausfallen.

Eine Herausforderung bleibt die Beibehaltung der Randbedingungen aufgrund der hohen Komplexität der Ausgangsgeometrie. Beispielhaft ist in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** der Ausschnitt aus dem Histogramm der Zellqualität des aktuellen Simulationsmodells hinsichtlich der orthogonalen Qualität dargestellt. Gezeigt ist die Anzahl der Elemente mit einer orthogonalen Qualität schlechter als 0,2 welche mangelhafte Eignung für ein funktionierendes Modell bedeuten. Diese insgesamt etwa 5000 Elemente müssen derzeit händisch identifiziert und optimiert werden, damit das Simulationsmodell verwertbare Aussagen treffen kann.

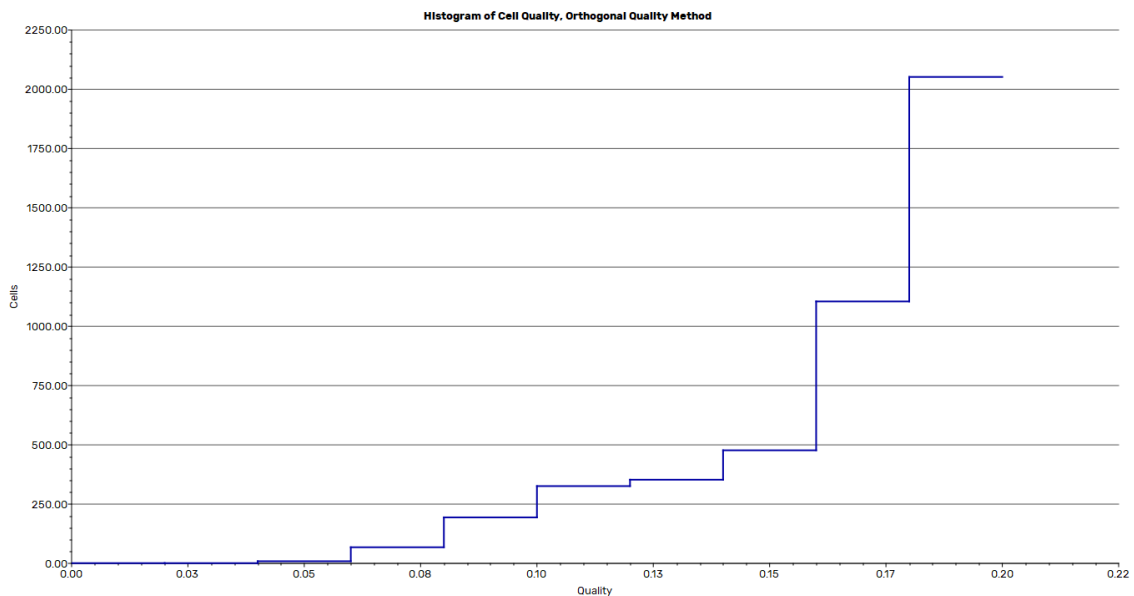


Abbildung 23: Ausschnitt aus dem Histogramm der Zellqualität des aktuellen Simulationsmodells hinsichtlich der Orthogonal Quality. Gezeigt ist die Anzahl der Elemente mit einer orthogonalen Qualität schlechter als 0,2 welche mangelhafte Eignung für ein funktionierendes Modell bedeuten. Diese insgesamt etwa 5000 Elemente müssen derzeit händisch identifiziert und optimiert werden, damit das Simulationsmodell verwertbare Aussagen treffen kann.

Die komplexe Geometrie in der Region der Auslassöffnungen benötigt ein noch komplexeres Volumen-Netzmodell (dargestellt in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). Die Kleinteiligkeit der Geometrie am Tool-Ende erfordert sehr kleine volumetrische Einzelzellen im Vergleich zum Gesamtvolumen des zu simulierenden Bondtools. So besteht das aktuelle Modell aus etwa 13.000.000 Elementen. Diese Simulationsgeometrie übersteigt aktuell die vorhandene Rechen- und Speicherkapazität unserer eingesetzten Simulationshardware. Um diese Begrenzung zu überwinden, müssen wir unter anderem die Anzahl der Elemente um 30-50 % verringern. Dabei besteht stets die Gefahr das bei einer automatischen Vereinfachung der Geometrie die Aussagefähigkeit der Simulation vermindert würde.

Denn der grundsätzlich verfolgte Lösungsansatz zur Erstellung eines aussagekräftigen Modells ist eine Verfeinerung des Simulationsnetzes unter Berücksichtigung der oben aufgelisteten Randbedingungen. Diese Verfeinerung führt wiederum leider zu einer schnellen Steigerung der Anzahl der Elemente. Das geplante Vorgehen ist unter Berücksichtigung der wesentlichen Geometrieaspekte ein skalierbares Netz guter Qualität herzustellen das sich unabhängig von der Zahl der Elemente erweist.

Basierend auf den Simulationen wurde ein neues Lasertool entwickelt, das folgende Verbesserungen umfasste:

- **Crossjet:** Reduzierter Druckluftverbrauch und längere Lebensdauer des Schutzglases, was die Energie- und Betriebskosten senkt.
- **Einspüldüsen:** Vermeidung von Schmauchansammlungen, die zu Schweißabbrüchen führen könnten.
- **Symmetrische Auslassanordnung:** Effektive Verhinderung von Schweißspritzeraustritt und Produktkontaminationen.

Die ringförmigen und symmetrischen Auslassöffnungen verhindern das Austreten von Schweißspritzen durch einen Labyrinth-Effekt, was für Kunden in der Batteriemodul- und Leistungselektronikfertigung wichtig ist. Die komplexe Geometrie erschwert jedoch die Erstellung eines effektiven Simulationsmodells, da die Volumenelemente bestimmte Randbedingungen erfüllen müssen. Die hohe Komplexität der Geometrie erforderte eine manuelle Optimierung von etwa 5000 Elementen, um verwertbare Simulationsergebnisse zu erzielen.

Das erste Simulationsmodell besteht aus etwa 13 Millionen Elementen und überstieg die vorhandene Rechen- und Speicherkapazität. Eine Reduzierung der Elemente um 30-50 % war notwendig, ohne die Aussagefähigkeit der Simulation zu beeinträchtigen. Ziel war es, ein skalierbares Netz guter Qualität zu erstellen, das unabhängig von der Anzahl der Elemente ist.

Schliesslich wurde die Netzqualität des Simulationsmodells optimiert und die Anzahl der Elemente so weit reduziert, dass das Modell auf einem Rechner mit 64 GB RAM lauffähig ist. Dies war ein wichtiger Schritt, um die Simulationen effizienter und zugänglicher zu machen. Das Modell konvergiert nun in seinen Stabilitätskriterien, einschließlich der Kontinuität der x-, y- und z-Geschwindigkeitskomponenten, Energie,  $k$ ,  $\Omega$  sowie der Stickstoffkonzentration ( $n_2$ ). Diese Konvergenz ist sowohl für das Bändchen als auch für das neue TAB Tool gelungen.

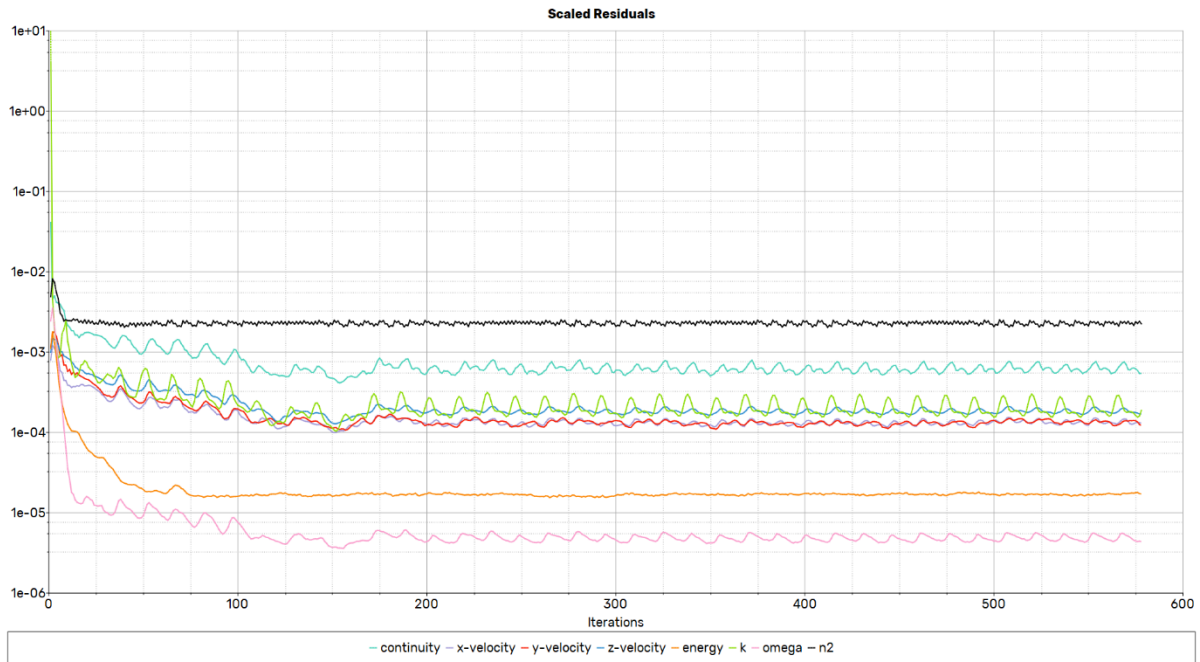


Abbildung 24 Residuenverläufe der Strömungssimulation des Bändchentools

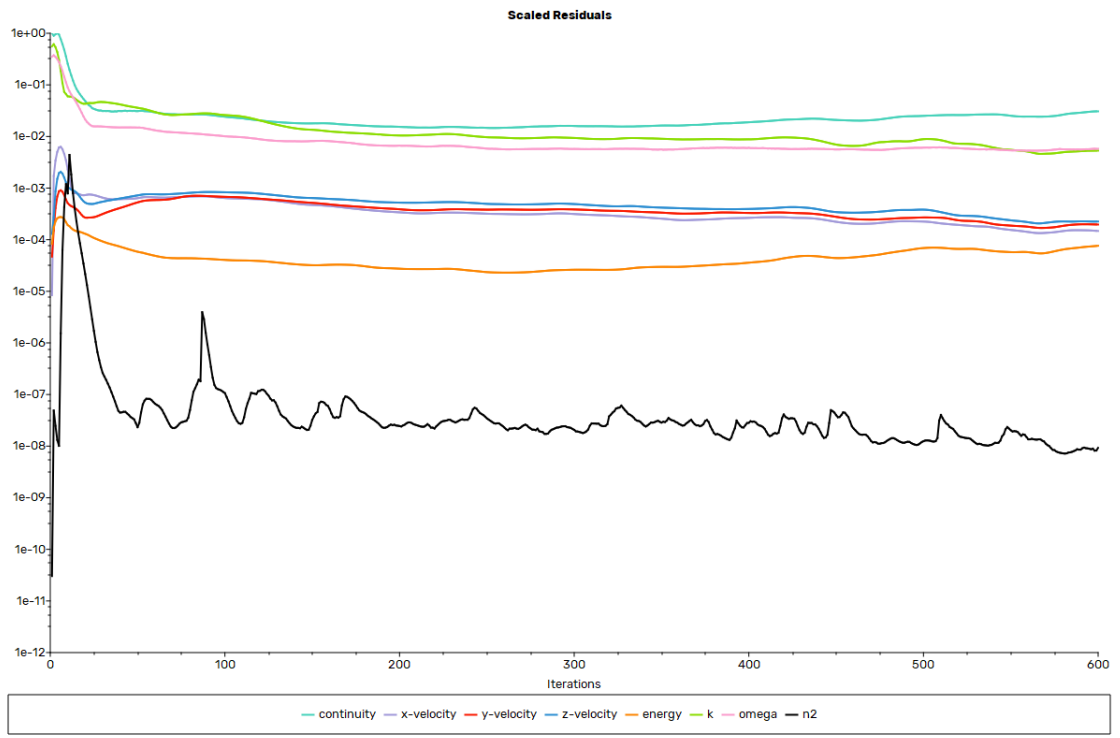


Abbildung 25 Residuenverläufe der Strömungssimulation des neuentwickelten TAB-Tools

Trotz dieser Fortschritte sind einige der Residuen weiterhin auf einem zu hohen Niveau. Residuen sind die Differenzen zwischen den berechneten und den tatsächlichen Werten in der Simulation und können auf Ungenauigkeiten im Modell hinweisen. Der Strömungsverlauf, der nun in den Simulationen sichtbar ist, zeigt Asymmetrien. Diese Asymmetrien sind zwar durch den mehrfach umgelegten Gasfluss und die daraus resultierenden Turbulenzen begründbar, sie könnten jedoch auch auf Ungenauigkeiten im Simulationsmodell hinweisen. Es ist wichtig, diese Asymmetrien zu verstehen und zu korrigieren, um die Genauigkeit der Simulationen zu verbessern.

Um diese Ungenauigkeiten zu beheben, muss das Modell in weiteren Schritten anhand einfacher Geometrien überprüft werden. Dies bedeutet, dass zunächst weniger komplexe Geometrien simuliert werden, um die grundlegenden Strömungseigenschaften und die Stabilität des Modells zu validieren. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse sollen dann in ein verbessertes Modell einfließen. Durch diese iterative Vorgehensweise kann das Modell schrittweise verfeinert und optimiert werden, um letztendlich eine höhere Genauigkeit und Aussagekraft der Simulationen zu erreichen.

Insgesamt zeigt dieser Prozess die Herausforderungen und die Komplexität der Modellierung und Simulation in der Fluidodynamik. Die kontinuierliche Optimierung und Validierung des Modells sind entscheidend, um zuverlässige und verwertbare Ergebnisse zu erzielen, die für die praktische Anwendung des Laserbondens in der Batteriemodul- und Leistungselektronikfertigung von großer Bedeutung sind.

Basierend auf den Simulationen konnte ein neues Tabtool designt werden

## AP 6 Techno-ökonomische

## Bewertung

### Arbeitspaket 6.1: Kostenrechnung für die entwickelten Prozesse und Anlagenteile

Im Rahmen des Arbeitspakets 6.1 wurde eine detaillierte Kostenrechnung für die entwickelten Prozesse und Anlagenteile durchgeführt. Der Fokus lag auf dem Nanosekundenlaser-basierten Laserbonden, dessen Einsatz einen gewissen technischen Vorteil in der Fertigung von Aluminium-Stahl-Verbindungen bietet.

Die ökonomischen Vorteile des Nanosekundenlasers ergeben sich durch Einsparungen in der Herstellung. Die Produktionsvariante "Nanopulse" zeigt Einsparungspotenziale bei verschiedenen Komponenten:

- **Schaltschrank:**
- **Einsparung eines separaten Laser PC**
- **Wasserkühler**
- **Schläuche und weitere Komponenten**

Insgesamt ergeben sich durch die genannten Neuerungen nur geringe Einsparungen in der Herstellung der Nanopulse Basismaschine.

Neben den ökonomischen Vorteilen bietet der Nanosekundenlaser weitere technische Vorteile:

- **Schweißqualität:** Der Nanosekundenlaser ermöglicht, wie gezeigt, eine ähnliche Schweißqualität von Aluminium mit Kupfer bei geringerer maximaler Verbinderstärke im Vergleich zu unserem Standard-Laserschweißprozess.
- **Platzbedarf:** Der geringere Platzbedarf des Systems erleichtert die Integration in eine Fertigungslinie.
- **Standardkomponenten:** Der Wechsel auf weitere Standardkomponenten ist möglich, was die Wartung und den Austausch von Teilen vereinfacht.

Um eine Serienmaschine erfolgreich zu entwickeln, sind folgende Schritte erforderlich:

- **Integration der Nanopulsansteuerung per Hardware:** Dies ist notwendig, um eine präzise Steuerung des Lasers zu gewährleisten.
- **Abschluss der Eigenentwicklung der LaserPC Software BondControl:** Die Software muss fertiggestellt werden, um eine optimale Steuerung und Überwachung des Schweißprozesses zu ermöglichen.

Ein Nachteil des neuen Systems ist, dass das Laser Weld Monitoring (LWM) der Firma Precitec nicht im gleichen Maße verwendet werden kann. Dies erfordert Anpassungen und möglicherweise die Entwicklung neuer Überwachungsmethoden.

Die Einführung des Nanosekundenlaser-basierten Laserbonders bietet sowohl ökonomische als auch technische Vorteile. Die Einsparungen in der Herstellung sind jedoch überschaubar und die nur leicht verbesserten technischen Eigenschaften machen das System nur unter Umständen zu einer alternativen Option für die Fertigung von Aluminium-Stahl-Verbindungen für Batteriezellen.

## Arbeitspaket 6.2: Betrachtung des technischen und wirtschaftlichen Nutzens für den Kunden

Im Rahmen des Arbeitspakets 6.2 wurde ein umfassendes Analysemodell entwickelt, um den technischen und wirtschaftlichen Nutzen für den Kunden individuell abschätzen und darstellen zu können. Dieses Modell basiert auf Excel und ist als „universelles“ TCO (Total Cost of Ownership) -Analysemodell konzipiert, welches die im Projekt erarbeiteten Technologien miteinander und mit Vergleichstechnologien über einen Zeitraum von fünf Jahren vergleicht.

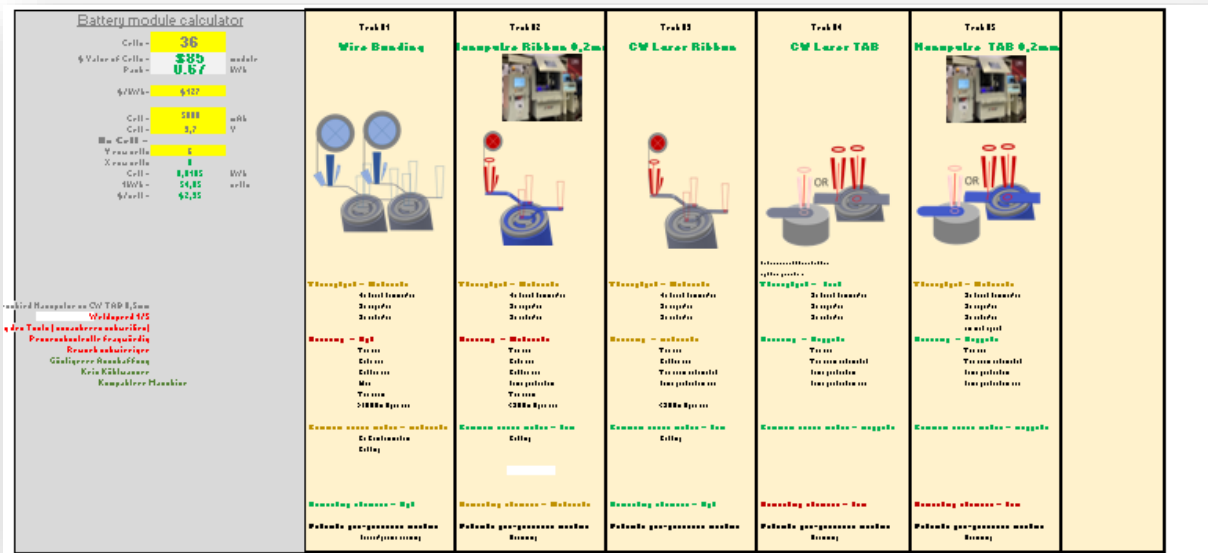
Das TCO-Analysemodell umfasst verschiedene Aspekte, die für eine ganzheitliche Bewertung der Technologien relevant sind:

- **Cyclezeit:** Die Zeit, die für einen vollständigen Produktionszyklus benötigt wird.
- **Yield:** Der Ertrag oder die Ausbeute der Produktion.
- **Personaleinsatz:** Die Anzahl der benötigten Mitarbeiter und deren Arbeitszeit.
- **Operation:** Betriebskosten und -prozesse.
- **Consumables:** Verbrauchsmaterialien und deren Kosten.
- **Auslastung:** Die Nutzungskapazität der Maschinen.
- **PRU Complexity:** Die Komplexität der Produktions- und Reparatereinheiten.

Im Rahmen des Projekts wurde ein umfassender Technologievergleich erarbeitet, der folgende Technologien umfasst:

- **US-Wire Bonding:** Drahtbonding mit Ultraschall.

- **CW Laser Ribbon Bonding:** Kontinuierlich arbeitender Laser für das Bonden von Bändern.
- **NanoPulse Ribbon Bonding:** Nanosekunden-Laser für das Bonden von Bändern.
- **CW Laser TAB Welding:** Kontinuierlich arbeitender Laser für das Schweißen von TAB-Verbindungen.
- **NanoPulse TAB Welding:** Nanosekunden-Laser für das Schweißen von TAB-Verbindungen.



Das Modell berücksichtigt globale Parameter, die für die Bewertung der Technologien entscheidend sind:

- **Automatisierbarkeit:** Die Fähigkeit, die Technologie in automatisierte Produktionslinien zu integrieren.
- **Linienverfügbarkeit:** Die Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit der Produktionslinien.
- **Kosten der Verbrauchsmaterialien:** Die Kosten für die benötigten Verbrauchsmaterialien.
- **Ressourcen:** Die benötigten Ressourcen für die Produktion.

Zusätzlich zu den globalen Parametern werden technologieabhängige Parameter in das Modell einbezogen:

- **Indexing Zeit:** Die Zeit, die für das Positionieren und Ausrichten der Materialien benötigt wird.
- **Yield:** Der Ertrag oder die Ausbeute der Produktion.
- **Reworkability:** Die Möglichkeit, fehlerhafte Produkte nachzubessern.
- **Produktions ramp up:** Die Zeit, die benötigt wird, um die Produktion hochzufahren.
- **Schweißzeiten pro Zelle:** Die Zeit, die für das Schweißen jeder einzelnen Zelle benötigt wird.
- **Qualität der Schweißnähte:** Die Qualität und Zuverlässigkeit der Schweißverbindungen.

Das Modell berücksichtigt auch spezifische Produktparameter:

- **Anzahl der zu produzierenden Module pro Jahr:** Die jährliche Produktionsmenge.
- **Anzahl der Schweißpunkte pro Modul:** Die Anzahl der Schweißverbindungen pro Modul.

- **Anzahl der Bilderkennungspunkte pro Modul:** Die Anzahl der Punkte, die für die visuelle Inspektion benötigt werden.

Die Ausgabewerte des Modells umfassen:

- **Anzahl der nötigen Maschinen:** Die Anzahl der Maschinen, die für die Produktion benötigt werden.
- **Investitionskosten:** Die Kosten für die Anschaffung der Maschinen und Anlagen.
- **Laufende Kosten:** Die Betriebskosten, einschließlich Wartung und Verbrauchsmaterialien.
- **Personaleinsatz:** Die Anzahl der benötigten Mitarbeiter und deren Arbeitszeit.

Das entwickelte TCO-Analysemodell bietet eine umfassende und detaillierte Bewertung der verschiedenen Technologien und deren wirtschaftlichen Nutzen. Es ermöglicht den Kunden, fundierte Entscheidungen über die Implementierung der Technologien in ihre Produktionsprozesse zu treffen und die langfristigen Kosten und Vorteile zu verstehen. Durch die Berücksichtigung sowohl globaler als auch technologieabhängiger Parameter bietet das Modell eine ganzheitliche Perspektive auf die Total Cost of Ownership und unterstützt die Optimierung der Produktionsprozesse.

Im Projekt wurden Beispielrechnungen gezeigt welche die Stückkosten von zwei Verschiedenen Produktionsszenarien, technologieabhängig vergleicht:

- 0,2mm dickes Aluminumbändchen Leopard Pack mit 36 Zellen (2 Module pro Werkstückträger)
- 0,2mm dickes Aluminiumbändchen für ein größeres Batteriepack mit 100 Zellen (1Modul pro Werkstückträger)

## Arbeitspaket 6.4: Vergleich der entwickelten Nanosekunden Laserbond-Anlage mit dem Technologietrend

Im Rahmen des Arbeitspakets 6.4 wurde die entwickelte Nanosekunden Laserbond-Anlage im Kontext aktueller Technologietrends und Anforderungen analysiert. Diese Analyse zielt darauf ab, die Vorteile und Herausforderungen der neuen Technologie im Vergleich zu bestehenden Verfahren darzustellen.

Im Jahr 2020 war das US-Drahtbonden die vorherrschende Verbindungstechnik. Aluminium- und Kupfer-Ribbon mit einer Dicke von 0,2 mm wurden standardmäßig für das Laserbonding verwendet, wobei diese Technologie ausschließlich von Delvotec eingesetzt wurde.

Die Anforderungen und Trends in der Batteriemodulfertigung haben sich seitdem erheblich weiterentwickelt. Größere Batteriezellen, mindestens im Format 21700, sind nun Standard, wobei das Format 46xx zunehmend bevorzugt wird. Höhere Energiedichten und Ladeströme erfordern dickere Kupferverbinder mit Dicken über 0,3 mm oder Aluminiumverbinder mit Dicken über 0,5 mm, um die nötige

Stromtragfähigkeit zu gewährleisten. Der Trend geht zu größeren Batteriemodulen oder -packs, was das bündchenfreie Bonden ökonomischer macht und den bündchenfreien TAB-Prozess bevorzugt.

Die Sicherheitsanforderungen sind allgemein gestiegen, und Aspekte der Industrie 4.0 werden immer wichtiger. Prozessüberwachung ist nun ein Mindeststandard, um die Qualität und Sicherheit der Produktion zu gewährleisten. Ein enormer Vorteil der Nanosekunden Laserbond-Anlage ist die wasserfreie Kühlung, die ein Risikoszenario in der Batteriemodulfertigung ausschließt.

Im Automobilbereich geht der Trend hin zu LFP (Lithium-Eisen-Phosphat) statt NMC (Nickel-Mangan-Cobalt) Zellchemie. Dies führt zu größeren Batteriezellen und Modulen mit höherem Ladestrom, was ebenfalls dickere Verbinder und größere Schweißnahtflächen erfordert. Statt der früher üblichen 18650-Zellen werden nun 21700- oder 46xx-Rundzellen verwendet.

Der Kostendruck bevorzugt Aluminium als Verbinder, jedoch in größeren Dicken als für den Nanopuls laser technisch sinnvoll möglich.

Aus diesen Entwicklungen ergibt sich ein neues Produktionsszenario. Eine Beispielrechnung und Visualisierung mit einem 0,5 mm starken Aluminiumverbinder für ein großes Batteriepack mit 100 Zellen (1x pro Werkstückträger) zeigt die Vorteile und Herausforderungen der neuen Technologie. Die wasserfreie Kühlung und die Fähigkeit, dickere Verbinder zu schweißen, machen die Nanosekunden Laserbond-Anlage zu einer validen Option für die moderne Batteriemodulfertigung.

Die Analyse zeigt, dass die Nanosekunden Laserbond-Anlage sowohl technische als auch wirtschaftliche Vorteile bietet, die den aktuellen Trends und Anforderungen in der Batteriemodulfertigung entsprechen. Die Integration dieser Technologie in die Produktionsprozesse kann die Effizienz und Sicherheit erhöhen und gleichzeitig die Kosten senken. Weitere Entwicklungen und Anpassungen sind notwendig, um die Serienreife der Anlage zu gewährleisten und ihre Vorteile voll auszuschöpfen.

## Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Neben den Personal und Materialkosten (Schliffbilder der Batteriezellen) waren die wichtigsten Posten im Projekt:

- Strahlquelle: TruPulse 2020 nano (FK10-EP) (Nanosekunden-Laser)
- Lasersystem mit angepasster Strahlführung und Kollimator
- Laserbondtool prototypen
- CADFEM GmbH Projektschulung CFD Simulation (Schulung für Aspekte der Strömungssimulation)

## Notwendigkeit der Arbeit

Das Projekt zielte auf eine substantielle Steigerung der Produktivität bei der Herstellung von Batteriemodulen und -packs mittels eines innovativen Laserbondverfahrens ab. Vor dem Hintergrund der

zunehmenden Elektrifizierung des Verkehrssektors, des wachsenden Bedarfs an stationären Energiespeichern und der Volumensteigerung bei tragbaren Anwendungen war diese Entwicklung von zentraler Bedeutung. Die Senkung der spezifischen Kosten für leistungsstarke und langzeitstabile Stromspeicher stellt eine essenzielle Voraussetzung für den erfolgreichen Ausbau einer nachhaltigen Energiewirtschaft dar.

Die Projektarbeiten adressierten technologische Engpässe, die bislang einer wirtschaftlichen Serienproduktion moderner Hochvolt-Batteriesysteme im Wege standen. Insbesondere die Verschaltung temperatursensitiver Batteriezellen stellte eine Herausforderung dar, da herkömmliche Fügeverfahren hinsichtlich Prozessgeschwindigkeit, Materialkompatibilität, Kontaktqualität und Automatisierungspotenzial an ihre Grenzen stießen.

Mit dem weiterentwickelten Laserbonden wurde ein Verfahren erarbeitet, das diese Anforderungen gleichzeitig adressieren konnte. Die gezielte Entwicklung neuer Strahlquellen, die intelligente Prozessführung zur automatisierten Qualitätssicherung sowie die simulationsbasierte Dimensionierung von Zellverbindern bildeten die zentralen Lösungsansätze des Vorhabens.

Im Fokus stand die Entwicklung lasergeschweißter Batteriemodule auf Basis von Lithium-Ionen-Zellen. Diese Zellen müssen in der industriellen Fertigung schnell, präzise, thermisch kontrolliert und materialsparend zu funktionsfähigen Modulen zusammengefügt werden. Das Laserschweißen ermöglichte dabei hochpräzise, reproduzierbare Verbindungen mit geringem Wärmeeintrag – ein entscheidender Vorteil gegenüber konventionellen Verfahren. Die erzielte Kombination aus hoher elektrischer Leitfähigkeit, mechanischer Stabilität und Prozesssicherheit war insbesondere für Anwendungen mit hohen Strombelastungen und Schnellladefähigkeit relevant.

Das Projekt trug somit wesentlich zur Lösung zentraler Herausforderungen in der Batteriefertigung bei. Es legte die technische Grundlage für eine effizientere und flexiblere Produktion zukünftiger Batteriesysteme und stärkte gleichzeitig die Innovations- und Wettbewerbsfähigkeit der beteiligten Partner auf einem strategisch bedeutsamen Technologiefeld.

## Verwertbarkeit der Ergebnisse

Im Rahmen des Projekts konnte die F & K DELVOTEC GmbH wesentliche Technologien entwickeln, die eine direkte Integration in das bestehende Produktportfolio ermöglichen. Durch die im Projekt erzielten Fortschritte ist es nun möglich, Laserbondanlagen mit den neu entwickelten Prozess- und Werkzeuginnovationen am Weltmarkt anzubieten.

Die im Projekt erarbeiteten technologischen Ergebnisse umfassen:

Einsatz eines Nanosekundenlasers für Aluminium-Stahl-Verbindungen, mit der Option, perspektivisch auch grüne Lasersysteme einzusetzen, verbesserte Prozessführung durch die Implementierung eines Lasergeometrie-Editors, optimiertes Laserbond-Tool design, ermöglicht durch umfangreiche Strömungssimulationen, sowie die integrierte Prozessüberwachung, die eine produktivere und ausschussarme Fertigung von Batteriemodulen unterstützt.

Die wirtschaftliche Verwertbarkeit der Projektergebnisse zeigt sich in der Erweiterung des Maschinenportfolios um Anlagen mit diesen innovativen Technologien. Typische Verkaufspreise für derart ausgestattete Laserbondanlagen liegen – abhängig von Automatisierungsgrad und Umfang der Prozessmonitoring-Funktionen – zwischen 350.000 € und 500.000 €. Angesichts des dynamischen Wachstumsmarktes im Bereich der Elektromobilität erscheint ein jährliches Absatzvolumen von 10 bis 15 Maschinen realistisch.

Die durchgeführte technoökonomische Bewertung hat gezeigt, dass das Absatzpotenzial für rein nanosekundenlaserbasierten Maschinen geringer ausfällt als ursprünglich angenommen. Dennoch stellen insbesondere die verbesserte Prozessteuerung und Überwachung sowie das neue Laserbond-Tool-design zentrale und unverzichtbare Komponenten für zukünftige Anlagen zur Batteriekontaktierung dar. Auf dieser Basis können die Projektergebnisse unmittelbar in kommerziell verwertbare Produkte umgesetzt und langfristig am Markt etabliert werden.

## Relevante Ergebnisse von dritter Seite

Die Laserschweißtechnologie hat sich in den letzten Jahren als industrieller Standard in der Fertigung von Batteriemodulen durchgesetzt, insbesondere bei modernen Lithium-Ionen-Systemen für Anwendungen in der Elektromobilität, stationären Energiespeichern und tragbaren Geräten (Peters & Schmidt, 2020; Fraunhofer ILT, 2020). Im direkten Vergleich zu alternativen Fügeverfahren wie dem Ultraschallschweißen oder mechanischen Verbindungstechniken bietet das Laserschweißen eine Reihe technologischer Vorteile: Dazu zählen eine hohe Prozessgeschwindigkeit, die präzise und lokal begrenzte Energieeinbringung, eine geringe thermische Belastung angrenzender Zellbereiche sowie eine sehr gute Eignung für die Automatisierung (Peters & Schmidt, 2020).

Vor dem Hintergrund der globalen Elektrifizierung und des steigenden Bedarfs an leistungsfähigen Stromspeichern investieren zahlreiche Industrieunternehmen in den Ausbau hochautomatisierter Produktionslinien, in denen Laserschweißsysteme eine zentrale Rolle einnehmen (IEA, 2023; Fraunhofer ILT, 2020). Insbesondere die Kontaktierung von Zellpolen mit Stromschiene stellt hohe Anforderungen an die Prozessqualität, Reproduzierbarkeit und thermomechanische Stabilität – Anforderungen, die mit Laserschweißverfahren zuverlässig erfüllt werden können.

Internationale Marktführer setzen diese Technologie bereits flächendeckend ein: So nutzt Tesla in seinen sogenannten „Gigafactories“ hochautomatisierte Fertigungslinien mit lasergeschweißten Zellverbindungen und hohen Durchsatzraten (Tesla Inc., 2021). Auch der chinesische Hersteller CATL integriert Laserschweißprozesse umfassend in seine Modul- und Packfertigung (CATL, 2022). Südkoreanische Unternehmen wie LG Energy Solution und Samsung SDI fokussieren auf die Optimierung von Packdichte und thermischer Performance unter Nutzung laserbasierter Fügetechnologien (IEA, 2023).

In Europa treiben OEMs wie Volkswagen – insbesondere mit dem Tochterunternehmen PowerCo – sowie BMW, Mercedes-Benz und Porsche den Aufbau eigener Laserschweißlinien in Zusammenarbeit mit Maschinenbauunternehmen wie Trumpf, Manz und Dürr voran (VDA, 2021; Volkswagen AG, 2023).

Die zunehmende Diversität bei Zellformaten – etwa Pouch-, prismatische und Rundzellen (z. B. Typ 4680) – sowie der Bedarf an standardisierten, skalierbaren Fertigungsprozessen unterstreichen die

strategische Bedeutung des Laserschweißens für die nächste Generation der Batteriefertigung (Fraunhofer ILT, 2020; Peters & Schmidt, 2020). Die Verbindung aus hoher Effizienz, Prozesskontrolle und Industrie-4.0-Kompatibilität macht das Verfahren zu einem zukunftsweisenden Schlüsselprozess in der Serienproduktion moderner Energiespeichersysteme (IEA, 2023).

## Erfolge oder geplante Veröffentlichungen

Die Ergebnisse und Zwischenergebnisse wurden und werden auf Fachmessen wie Productronica, The Battery Show und der PCIM sowohl auf dem Messestand gezeigt als auch auf Vorträgen während den Messen präsentiert, sowie in Kundengesprächen geteilt.