

Sachbericht zum Verwendungsnachweis

Teil 2 – Eingehende Darstellung (max. 20 Seiten)

Vorhabenbezeichnung: IDEEL – Implementation of Laser Drying Processes for Economical & Ecological Lithium Ion Battery Production	
Zuwendungsempfänger: Laserline GmbH	Förderkennzeichen 03XP0414A
Projektleiter*in Simon Britten Max Schütze	Laufzeit 01.09.2021 – 31.12.2024

1. Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse des Teilvorhabens

Im Rahmen des Projektes hat Laserline ein Funktionsmuster für die Prozessentwicklung im Laborstadium bei den Konsortialpartnern aufgebaut. Weiterhin wurde im Schwerpunkt ein Entwicklungsmuster als Demonstrator für einen Trocknungseinsatz bei industrienahen Einsatzbedingungen entwickelt. Folgende Teilprojektziele sind im Rahmen des Projektes realisiert worden:

- Die Entwicklung und Realisierung eines Funktionsmusters mit 8kW Laserleistung und mit variabel einstellbarer Bestrahlungsfläche von 50 x 50 mm² bis 110 x 110 mm² zur Validierung und Prozessentwicklung bei den Projektpartnern
- Die Konzeptionierung und Entwicklung eines effizienten, kompakten und modularen Laserstrahlsystems mit 16 kW Leistung und einer resultierenden Bestrahlungsfläche von ca. 550 x 280 mm² zum Einsatz auf einer industrienahen Rolle-zu-Rolle Demonstratoranlage.
- Die Integration einer kontaktlosen Niedrig-Temperatur Thermographietechnik in die Laserbearbeitungsoptik für die Prozessüberwachung- und regelung mittels einer neuartigen opto-mechanischen Schnittstelle.

1.1 Unterarbeitspaket 1.4: Experimentelle Untersuchungen

Im Zuge dieses Unterarbeitspaketes wurde ein Funktionsträger für die Prozessentwicklung zur Trocknung von Elektroden entwickelt und aufgebaut.

Die Arbeiten aus diesem Unterarbeitspaket lassen sich in die drei Komponenten Lasersystem, Lichtleitfaser und Bearbeitungsoptik unterteilen.

Für die Komponente Lasersystem wurde eine Vielzahl an Laserline-Standardkomponenten verwendet, während der Entwicklung sind hier Modifikationen im Bereich der Strahlerzeugung und Strahlformung durchgeführt worden. Zur termingerechten Bearbeitung des Zwi-

schenergebnis ZE 1.4.1 (Bereitstellung 8kW Funktionsträger mit variabler Bestrahlungsfläche) wurde der Aufbau und das Qualifizieren des Lasersystems im Januar 2022 durchgeführt. Bei der abschließenden Leistungsmessung des Lasersystems wurde eine Ausgangsleistung von 8400W erreicht, und das Projektziel entsprechend erreicht.

Bei der Komponente Lichtleitfaser ist ein, auf bestehende Komponenten aufbauender, Prototyp konzipiert worden, welcher die speziellen Anforderungen des Arbeitspaketes erfüllt. Im Zuge des Arbeitspaketes UAP 3.1.2 soll dieser weiterentwickelt werden, um die Leistungsfähigkeit bis 16kW zu gewährleisten. Mithilfe des Funktionsträgers wurden hier Erfahrungen in der Anwendung gesammelt und Potenziale zur spezifischen Weiterentwicklung hinsichtlich Effizienzsteigerung gewonnen. So wurden beim Aufbau im Januar 2022 Temperaturmessungen mithilfe von Wärmebildkameras durchgeführt und kritische Komponenten mittels kalorimetrischer Messung überwacht.

Als dritte Komponente ist eine verstellbare Bearbeitungsoptik, Zoom-Optik genannt, konzipiert worden. Im Zuge des Projekt Kick-Offs konnten bereits erste Einflussfaktoren für den Trocknungsprozess identifiziert werden. Hieraus wurde die zu bestrahlende Fläche gegenüber dem Projektantrag leicht vergrößert. Das maximale Bearbeitungsfeld wurde von 100 x 100 mm² auf 110 x 110 mm² vergrößert. Die minimale Fläche blieb unverändert bei 50 x 50 mm².

Vergleicht man die simulierte Strahldichteverteilung (Abbildung 1) mit der gemessenen, lässt sich eine gute Übereinstimmung der Ergebnisse feststellen.

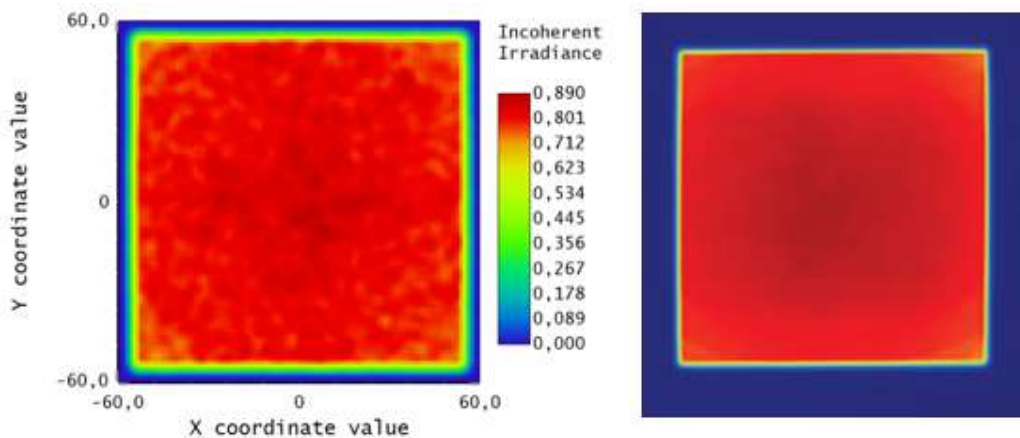


Abbildung 1: Abgleich der simulierten (links) und gemessenen (rechts) Leistungsdichteverteilung der Zoom-Optik für eine Spotgröße von ca. 110x110 mm²

1.2 Unterarbeitspaket 2.2: Integration einer Niedrigtemperatur-Prozesssensorik

Innerhalb des Unterarbeitspaketes bestand die erste Herausforderung in der Evaluierung eines geeigneten Glasmaterials, welches sowohl im nahinfraroten Wellenlängenbereich die Laserstrahlung als auch im langwelligen Infrarotspektrum die Niedrigtemperaturstrahlung transmittiert.

Hier wurden verschiedene Materialien hinsichtlich der genannten Anforderungen hin untersucht und in Zusammenarbeit mit bekannten Herstellern für optische Komponenten potenzielle Verfügbarkeiten sondiert. Als Ergebnis wurden die optischen Elemente aus Zinksulfid (ZnS) gefertigt. Aufgrund der Verfügbarkeit des Sondermaterials mit einer Lieferzeit von ca. 12 Monaten, wurden die Elemente parallel aus dem Standardmaterial Quarzglas beschafft. Hierdurch konnte eine Qualifizierung der mechanischen Elemente

erfolgen und die Auswirkungen auf das verzögerte Erreichen des Zwischenergebnisses 2.2.1b (Bereitstellung Prozesssensorikmodul an Optris) reduziert werden.

Das Layout für die Bearbeitungsoptik erfolgte in Zusammenarbeit mit Optris. Hierdurch wurde eine gemeinsame Lösung für die Schnittstelle zur Optris XI400-Kamera geschaffen. Dabei wurde gewährleistet, dass die Kamera ein ausreichendes Sichtfeld zur Prozessbeobachtung hat. Das entsprechend entwickelte Konzept (siehe Abb. 2) ermöglichte der Wärmebildkamera ein Sichtfeld von ca. $462 \times 346 \text{ mm}^2$, was in etwa der Spotgröße der Optik aus UAP 3.1.3 entspricht.

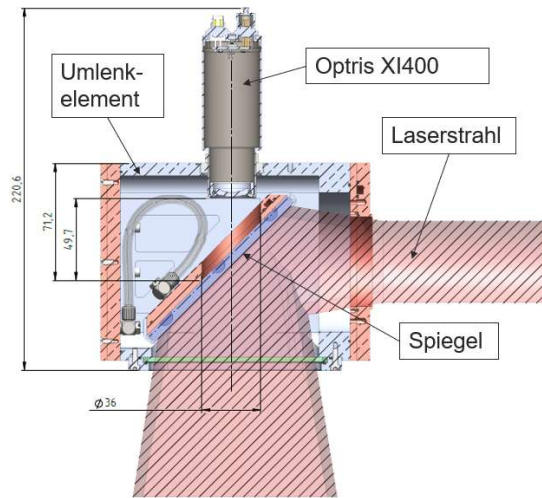


Abbildung 2: Schematische Anordnung der Wärmebildkamera im Umlenkelement der Bearbeitungsoptik

Zunächst wurde der Aufbau mit Quarzglas Komponenten realisiert und die mechanische Konstruktion, sowie das thermische Verhalten der Optikmechanik getestet. Bei den Versuchen mit bis zu 15kW Laserleistung konnte eine optische Transmission durch die Optik von ca. 96,5% gemessen werden, was oberhalb vergleichbarer Optiksyste me liegt. Auch bei den thermischen Untersuchungen konnten positive Messergebnisse aufgenommen werden.

Um die Entwicklungsergebnisse aus diesem Arbeitspaket nutzen zu können, wurde in Abstimmung mit dem Projektpartner ILT die Bearbeitungsoptik mit Quarzglas in ein Rolle-zu-Rolle Trocknermodul eingebaut und für die Weiterentwicklung des Trocknungsprozesses genutzt.

Nach Lieferung der Sonderkomponenten wurde eine weitere Umlenkeinheit aufgebaut und die thermische Schnittstelle zur Schnittstelle für koaxiale Niedrig-Temperatur Wärmebildkamera erprobt. Bei der Qualifizierung der Messfähigkeit der Kamera wurde eine Transmission des Messsignals von ca. 98,5% gemessen. Unter Laserleistung erwärmte sich das ZnS-Glas zudem nur um ca. 2K, die Einflussnahme durch Erhitzen des Spiegelglases wurde folglich als sehr gering eingestuft.

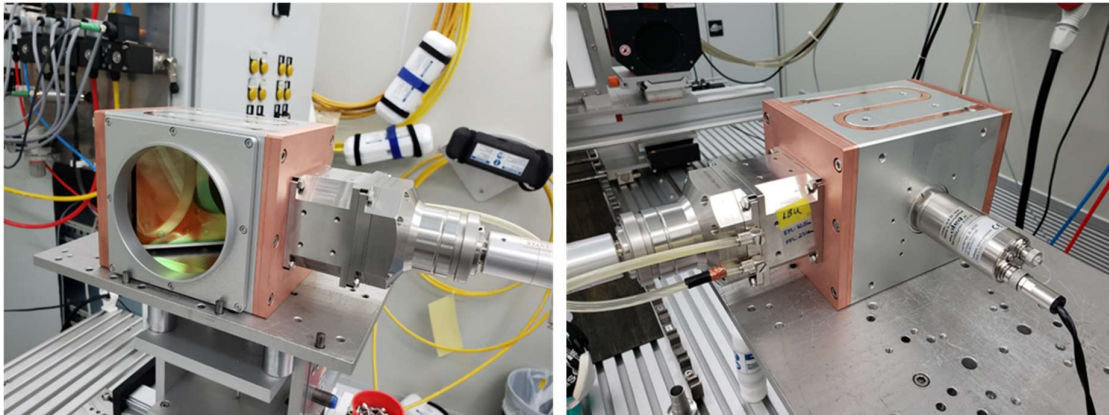


Abbildung 3: Realer Aufbau des Umlenkelements inkl. Schnittstelle zur Wärmebildkamera

1.3 Unterarbeitspaket 3.1: Entwicklung eines hocheffizienten und homogenen Laserbestrahlungssystems

Das Arbeitspaket 3.1 wurde aufgrund der unterschiedlichen Themenschwerpunkte in drei Unterarbeitspakete aufgeteilt. Zusammen ergeben die Komponenten Laserkopf, Lichtleitfaser und Optik ein Gesamtsystem, welches in der Demonstrator Anlage (AP3.3) eingesetzt wurde.

1.3.1 Unterarbeitspaket 3.1.1: Laserkopfentwicklung für das Trocknungssystem

Im Projekt wurde zunächst ein Konzept erarbeitet, mit dem die Anforderungen des Teilvorhabens hinsichtlich Leistung und Effizienzsteigerung erreicht werden konnten. Der Diodenlaser wurde mit sogenannten Doppelmodulen ausgestattet, welche ein neues Mikrolinsen-Elemente verwendet, um einen verlustarmen und somit effizienten Aufbau zu ermöglichen. Hierfür musste zunächst an einem Fertigungsverfahren zur Montage des Mikrolinsen-Elements gearbeitet.

In der frühen Phase des Projektes konnte mithilfe eines ersten Aufbaus eines Doppelmoduls auf Labormaßstab die prognostizierte Leistungssteigerung von >6% gegenüber bestehenden Lasersystemen demonstriert werden. Im Zusammenspiel mit mechanischen und optischen Komponenten ist in der Folge die Laserkopfarchitektur entstanden. Weiterhin wurden Komponenten für die Steuerungstechnik sowie die Basisschnittstellen zur Regelbarkeit des Systems weiterentwickelt und Funktionstests von Subkomponenten erfolgreich durchgeführt.

Im weiteren Projektverlauf erfolgte dann der Aufbau und das Testen des gesamten Lasers. Da ein wesentliches Projektziel neben der Laserleistung von 16kW in einer Effizienzsteigerung von >6% gegenüber vergleichbaren Lasersystem lag, wurde beim Testing des Systems ein Fokus auf den Steckdosenwirkungsgrad (engl. Wall-plug-Efficiency = WPE) gelegt.

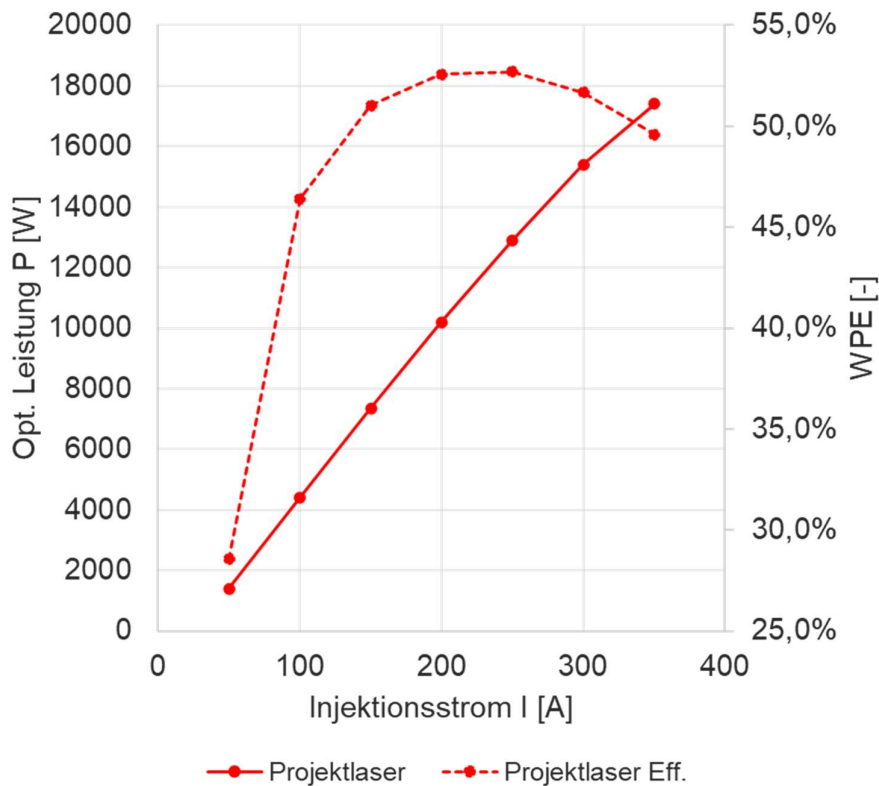


Abbildung 4: Messergebnisse zur Laserleistung und des Steckdosenwirkungsgrades

Wie in Abbildung 4 zu erkennen ist, wurde bei dem Lasersystem eine optische Leistung (am Ende der Lichtleitfaser aus UAP 3.1.2) von 17,4kW gemessen und somit das Projektziel der Leistung erreicht. Bei der Messung des Steckdosenwirkungsgrades (WPE) wurde im Maximum ein Wert von ca. 52,7% erreicht. Auch der Messwert bei maximaler optischer Leistung liegt oberhalb der 50% Marke. Vergleicht man die Messwerte des Projektlasers mit Messwerten Standardlasern, so liegt die Effizienz je nach Messpunkt 8 bis 10% über dem Durchschnitt.

Folglich wurden die Laserline Projektziele für optische Leistung und Effizienzsteigerung erreicht.

1.3.2 Unterarbeitspaket 3.1.2: Entwicklung einer effizienten Lichtleitfasertechnik für den Dauereinsatz in Trocknungssystemen

Bei der Lichtleitfaser wurde auf die Endkappenfaserarchitektur gesetzt. Bei den Tests mit der Lichtleitfaser für das Arbeitspaket 1.4 wurden erste Schwachstellen identifiziert. Bei den ersten Tests werden mehrere Einflussfaktoren erkannt, welche zur stetigen Weiterentwicklung optimiert werden konnten. Hier konnte beispielsweise durch die Variation der Reflektivität der Steckermechanik und der Positionierung von Strahlfallen ein Optimum ermittelt werden. Weitere Maßnahmen führten zu einer Reduzierung des thermischen Übergangs zwischen mechanischen Komponenten der Steckermechanik und dem Kühlwasser.

Außerdem wird die Beschaffenheit (Beschichtung, Politur, Form) der Endkappen selbst weiterentwickelt. Neben der optimierten Mechanik, wurde zudem eine optimierte Cladstruktur (Kombination aus Faserkern und Stützstrukturen) eingesetzt, welche die Faser robuster für hohe Laserleistungen, wie sie im Projekt verwendet werden, machen wird.

Abbildung 5 zeigt einen entsprechenden Vergleich der Endkappentemperatur an einer Faser mit optimierter Cladstruktur und verbesserten mechanischen Komponenten (blaue Linie) und einer Faser, welche den bisherigen Standardaufbau entspricht (orange Linie). So konnte durch eine Anpassung der Cladstruktur (äußere Stützstruktur um Faserkern) eine Reduzierung der Endkappentemperatur von Erstmuster ca. 280°C auf ca. 130°C bei optimiertem Muster, bei einer Laserleistung von ca. 14kW erreicht werden.

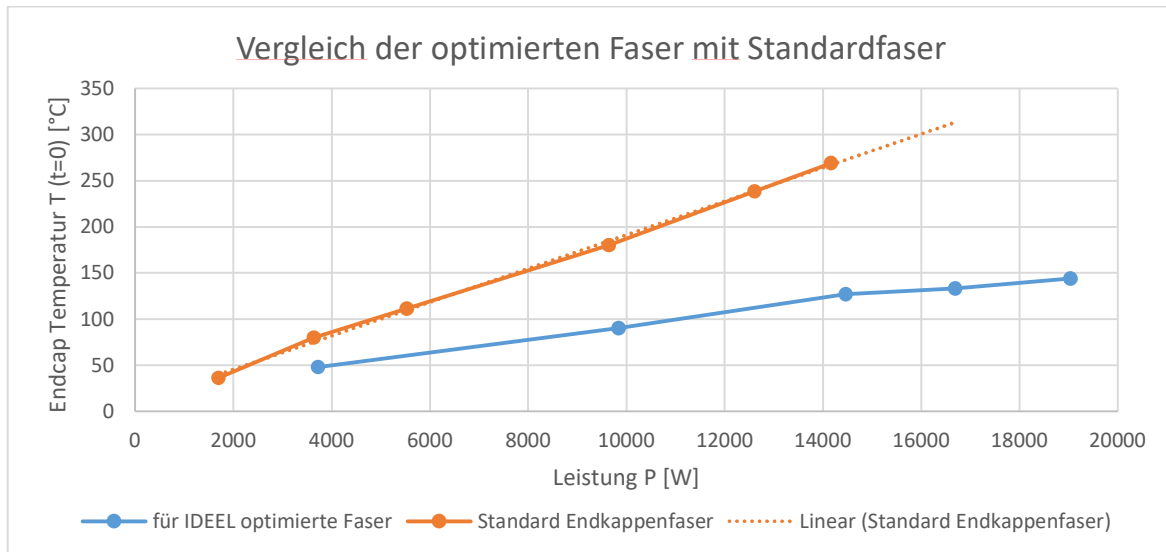


Abbildung 5: Vergleich der Endkappentemperatur unterschiedlicher Entwicklungsstände

Letztlich konnte die Robustheit der Faser so weit erhöht werden, dass ein Dauereinsatz mit dem Lasersystem nachgewiesen werden konnte.

Vergleicht man die Projektfaser mit einer Standardfaser am Projektlaser, kann zudem der Gewinn an Leistung gemessen werden. In Abbildung 6 wird der Sachverhalt mit Messdaten belegt. Über den gesamten Diodenstrombereich (350A entsprechen etwa 17,4kW, vgl. Abb. 4) kann hier ein Leistungsgewinn von mindestens 4,3% gemessen werden. Beim maximalen Diodenstrom liegt der Leistungsgewinn zudem bei 8,2%.

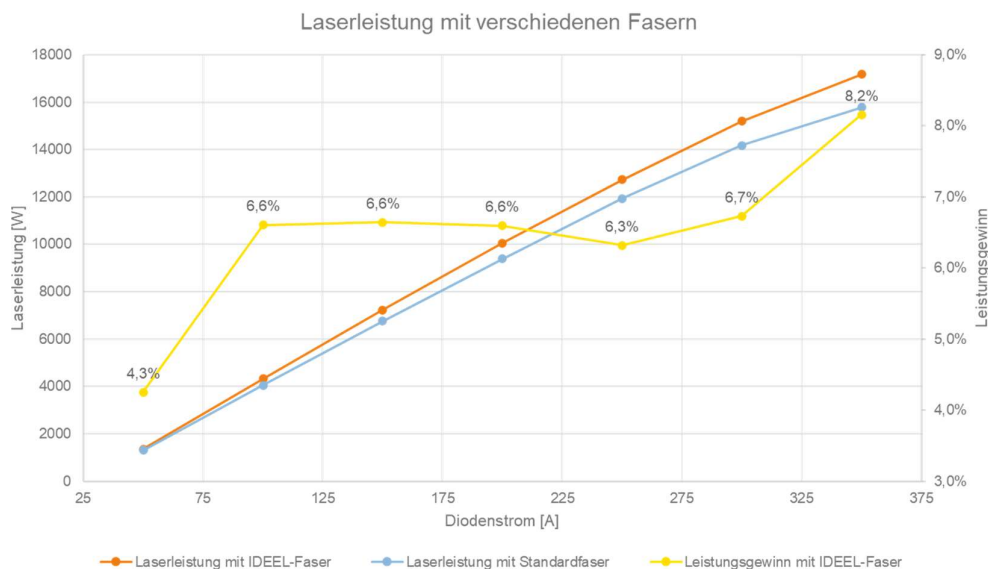


Abbildung 6: Leistungsgewinn der Projektfaser im Vergleich mit Standardfaser

1.3.3 Unterarbeitspaket 3.1.3: Optikentwicklung zur Erzeugung von großflächigen, homogenen Intensitätsverteilung

Neben der Entwicklung einer Umlenkeinheit, welche die Schnittstelle zur Temperaturmessung bietet (siehe UAP2.2), mussten weitere Komponenten zur Vervollständigung der Bestrahlungsoptik entwickelt werden (siehe Abbildung 7).

Hierzu wurde zunächst ein optisches Modell entwickelt, um Berechnungen und Simulationen erzeugen zu können. Die Anforderungen hinsichtlich Strahlgröße und Homogenität konnten so genutzt werden, um mechanischen Komponenten für die Optik zu konstruieren. Wie unter UAP 2.2 beschrieben, wurde die fertige Bestrahlungsoptik genutzt, um in der Entwicklungsanlage beim Projektpartner ILT die Weiterentwicklung des Trocknungsprozesses voranzutreiben.

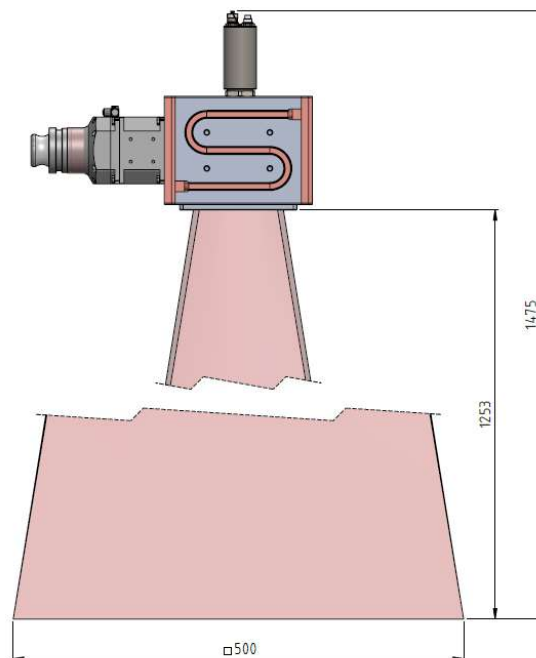


Abbildung 7: Schematische Darstellung der gesamten Bestrahlungsoptik

Durch den intensiven Austausch mit dem Projektpartner Coatema ist Konzept zur Integration des Lasermoduls in eine Demonstrator Anlage entstanden. Hierbei wurden Umsetzungslösungen für Laser- und Explosionssicherheit erarbeitet und weiterhin die Flexibilität der Anlage maximiert. In der Folge wurde eine weitere Bearbeitungsoptik designt, welche eine Bestrahlungsfläche von ca. 280 x 550 mm² erzeugt. Durch ihre geradlinige Bauform lässt sich die Optik um 90° um die eigene Achse drehen, somit kann flexibel auf unterschiedliche Substratbreiten reagiert werden.

1.4 Unterarbeitspaket 3.3: Konzeptionierung, Realisierung und Qualifizierung des Demonstrators

Während diese Arbeitspaketes stand Laserline regelmäßig im Austausch mit Coatema um bei der Konzeptionierung des Demonstrators zu beraten und Fragen zur Lasersicherheit zu beantworten.

Wie bereits im vorangegangenen Unterarbeitspaket beschrieben folgte aus der Konzeptphase ein weiteres Design für eine Bestrahlungsoptik. Da es im Demonstrator zwei Laserzellen gibt, wurde die Optik in zweifacher Ausführung gebaut.

Neben der Bereitstellung dieser zwei Optiken, wurde der Projektpartner mit der Leihgabe von Stand-Alone Luft-Wasser Wärmetauschern unterstützt. Mit der Inbetriebnahme der beiden Lasermodule (8kW als erste Stufe und 16kW als zweite Stufe) konnte Laserline dazu beitragen, dass Coatema eine Demonstration von laserbasierter Trocknung gelang.

2. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Laserline hat während der Projektlaufzeit keine Mittelumwidmungen beantragt. Die bereitgestellten Mittel wurden vollständig ausgeschöpft. Die Ausgaben wurden eingehalten. Für weitere Details, wird auf den zahlenmäßigen Nachweis verwiesen.

Eine zuwendungsneutrale Laufzeitverlängerung wurde als Teil des Projektverbundes eingereicht, da sich beim Projektpartner Coatema der Aufbau der Demonstrator Anlage (UA3.3: Konzept und Realisierung Demonstrator) verzögert hat. Das Teilvorhaben wurde um 3 Monate auf den 31.12.2024 verlängert.

3. Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Durch die Entwicklungsergebnisse ist es Laserline möglich im Bereich von Trocknungsanwendungen neue Kunden zu gewinnen. Hier ist eine unmittelbare Erfolgsaussicht nach Projektende gegeben. Durch die während der Projektlaufzeit gemachten Pressemitteilungen konnten neuen Kontakt zu Unternehmen aufgebaut werden. Auch in Zusammenarbeit mit den Projektpartnern lassen sich direkte Anknüpfungspunkte finden, um die erarbeiteten Ergebnisse und gemeinsam gewonnenen Kontakte wirtschaftlich gewinnbringend einzusetzen.

Darüber hinaus kann Laserline das gewonnene Knowhow zu Trocknungsanwendungen und Flächenleistungen nutzen, um es neben der Batterieproduktion auch in andere Anwendungsfelder, wie z.B. das Trocknen von Lackierungen, gewinnbringend einzusetzen. Hier erwartet sich Laserline, dass sich innerhalb der nächsten 1 bis 2 Jahre neue Anwendungsfelder ergeben werden.

Weiterhin nutzt Laserline die gewonnenen Erkenntnisse, um neue innovative Lösungen für Trocknungsanwendungen ins Produktportfolio aufzunehmen.

4. Während der Laufzeit bekannt gewordene, relevante Ergebnisse Dritter

Während der Projektlaufzeit sind keine Ergebnisse dritter Parteien bekannt geworden, welche die Ergebnisse des Vorhabens beeinflusst haben.

5. Erfolgte und geplante Veröffentlichungen

Während der Projektlaufzeit wurde zu verschiedenen Zeitpunkten Pressemitteilungen zum Projektverlauf und der Ergebnisse veröffentlicht.

2021 Pressemitteilung Projektkickoff: Forschungsprojekt IDEEL soll Verfahren erstmals auf industrielle Produktionsgeschwindigkeiten hochskalieren
2023 Pressemitteilung Meilenstein: IDEEL-Projekt: Erstmals Herstellung lasergetrockneter Anoden und LFP-Kathoden im Rolle-zu-Rolle-Verfahren gelungen
2024 Pressemitteilung Meilenstein: IDEEL-Projekt: Industrierelevante Skalierung von Lasertrocknungsverfahren für Lithium-Ionen-Batterien rückt in greifbare Nähe
2025 Pressemitteilung Projektabschluss: Durchbruch in der Lasertrocknung: IDEEL-Projekt demonstriert Skalierbarkeit für effiziente Batteriezellproduktion
2024 Vortrag „Laser systems for energy-efficient drying of battery electrodes“, Britten, AKL 2024

Fachartikel

Lfd. Nr.	Autoren	Titel	Journal, Volume, Issue, Page	DOI	Datum
1					
2					

Konferenzbeitrag

Lfd. Nr.	Autoren	Titel	Typ (Poster, Präsentation)	Konferenz/Tagung	Datum
1					
2					