

# Sachbericht zum Verwendungsnachweis

## Teil 1 – Kurzbericht

<b>Vorhabenbezeichnung:</b> IDEEL - Implementation of Laser Drying Processes for Economical & Ecological Lithium Ion Battery Production	
<b>Zuwendungsempfänger:</b> Coatema Coating Machinery GmbH	<b>Förderkennzeichen</b> 03XP0414B
<b>Projektleiter*in</b> Thomas Kolbusch <b>Projektkoordinator*innen</b> Kira Grefkes Harmen Rooms	<b>Laufzeit</b> 01.10.2021 - 31.12.2024

### 1. Ursprüngliche Aufgabenstellung

Die Arbeitsziele der Coatema umfassten sowohl die Prozessentwicklung und -optimierung als auch die Weiterentwicklung der Anlagentechnik für Beschichtungs- und Lasertrocknungsverfahren zur Herstellung von Lithium-Ionen-Batterien. Im Fokus standen zunächst die Entwicklung, Aufskalierung und Optimierung kontinuierlicher und intermittierender Beschichtungsprozesse für die in Arbeitspaket 1 entwickelten Materialien. Dazu zählen insbesondere die Verbesserung der zur Beschichtung genutzten Breitschlitzdüsengeometrie auf Basis von numerischen Simulationen sowie die anschließende Konstruktion, Herstellung und Validierung der optimierten Geometrie für Beschichtungsbreiten von 100 mm, 300 mm und 500 mm. Ein weiteres Ziel war die Entwicklung und der Bau eines Prototypen-Beschichtungsmoduls für kontinuierliche und intermittierende Beschichtungsprozesse, das in die Click&Coat®-basierte Rolle-zu-Rolle-Pilotlinie Linecoater integrierbar ist und Prozessgeschwindigkeiten bis zu 100 m/min erlaubt. In Bezug auf die Lasertrocknung sollte eine modulare Prototypen-Trocknungseinheit entwickelt werden. Die auf die Lasertrocknung der wasserbasierten Batterie-Pasten ausgelegte Methode, verfügt über eine prozesstechnisch geeignete Absaugvorrichtungen und Lasersicherheitsvorkehrungen, welche ebenfalls in die Pilotlinie von Coatema integrierbar ist. Diese stellt mit den neuentwickelten Beschichtungs- und Trocknungsmodulen den finalen Demonstrator dar, der bei Bahngeschwindigkeiten bis zu 30 m/min und Beschichtungsbreiten von 100 bis 300 mm getestet wurde. Ergänzend wurde ein Designkonzept für eine Rolle-zu-Rolle-Industrieanlage mit Arbeitsbreiten von bis zu 1100 mm erstellt.

### 2. Ablauf des Vorhabens

Die Entwicklung der oben genannten Beschichtungs- und Trocknungsmodule sowie der anwendungsspezifischen Breitschlitzdüsen wurde erfolgreich umgesetzt. Im Projektverlauf hat sich gezeigt, dass sich für einen Laserspot über die gesamte Beschichtungsbreite von 500 mm ein zu hoher Arbeitsabstand ergibt. Dadurch war es nicht möglich die Laser in existierende

Trocknungsmodule zu integrieren und eine umfassende Neuentwicklung des Moduls inklusive der Erstellung eines spezifischen Luftführungs- sowie Laserschutzkonzepts wurde notwendig. In Bezug auf die Entwicklung von intermittierenden Beschichtungsprozessen wurde aufgrund des hohen Arbeitsaufwandes in den anderen Arbeitspaketen der Fokus im Verlauf des Projekts primär auf kontinuierliche Beschichtungen gesetzt, insbesondere da ein Transfer der Ergebnisse zur Trocknung von kontinuierlichen, auch auf intermittierende Beschichtungen zu erwarten ist. In der Verarbeitbarkeit der wasserbasierten Batterie-Pasten haben sich aufgrund des hochviskosen und nicht-newtonschen Fließverhaltens sowie der angestrebten Prozessgeschwindigkeit, neue Anforderungen an die Pumpsysteme ergeben, wodurch die Verwendung von bisher nicht im Technikum vorhandener Pumpsysteme zwingend notwendig wurde.

### **3. Wesentliche Ergebnisse**

Auf der Grundlage der rheologischen Daten der in AP1 entwickelten Batterie-Pasten-Formulierung wurden numerische strömungsmechanische Simulationen (CFD: Computational Fluid Dynamics) erstellt. Finales Ergebnis war eine Schlitzdüsengeometrie in Doppelkammer-Konfiguration, die auf die spezifischen rheologischen Eigenschaften der Suspension zugeschnitten ist und sowohl eine verbesserte Strömungsgleichmäßigkeit als auch reduzierte Druckabfälle zeigt. Das Beschichtungsfenster wurde für Beschichtungsbreiten von 100 mm, 300 mm und 500 mm definiert und Schlitzdüsen mit diesen Arbeitsbreiten speziell für die projektinterne Batterie-Pasten-Formulierung konstruiert, hergestellt und in Beschichtungsversuchen erprobt. Die finalen Düsendesigns wurden erfolgreich darauf ausgelegt bei einer Prozessgeschwindigkeit von 30 m/min effizient zu arbeiten und gleichmäßige Beschichtungen mit einer Dicke von bis zu 250 µm zu produzieren. Coatema hat ein neues Beschichtungsmodul für die Click&Coat® basierte Pilotline entwickelt und integriert, welches für Geschwindigkeiten von bis zu 100 m/min geeignet ist und Beschichtungsbreiten von bis zu 550 mm ermöglicht. Mit der Beschichtungseinheit lassen sich sowohl kontinuierliche als auch intermittierende Beschichtungen umsetzen. In Bezug auf die Neuentwicklung der Lasertrocknungsmodule wurde zunächst ein Lasersicherheitskonzept für die Nutzung in offenen Fabrikhallen erstellt. Zur Entwicklung eines anwendungsspezifischen Luftführungskonzepts in den Lasertrocknungsmodulen hat Coatema CFD-Simulationen zur Auslegung der Geometrie, des Absaugsystems sowie zur Optimierung der Luftströmung, der Abschätzung des benötigten Massetransports und des Energietransfers durchgeführt. In der finalen Integration der zwei Laser (8 und 16 kW) des Projektpartners Laserline wurde jeweils eine maximale Laserspotgröße von 280 x 550 mm erreicht, wodurch die Abdeckung der im Projekt angestrebten Beschichtungsbreiten ermöglicht wurde. Zudem wurden IR-Kameras in die Trocknungseinheit integriert, diese dienen zur Überwachung des Prozesses und der automatisierten Intensitätssteuerung sowie der Abschaltung im Falle einer Überhitzung des Messbereichs über einen vordefinierten Temperaturwert. Final wurde die regelungstechnische Einbettung der Einzelkomponenten in die Click&Coat® basierte Pilotlinie umgesetzt. Die Trocknung der im Projekt entwickelten wasserbasierten Batterie-Pasten mittels der Lasertrocknungseinheiten wurde in stand-alone und hybriden Trocknungsversuchen mit Heißluft erprobt.

# Sachbericht zum Verwendungsnachweis

## Teil 2 – Eingehende Darstellung

<b>Vorhabenbezeichnung:</b> IDEEL - Implementation of Laser Drying Processes for Economical & Ecological Lithium Ion Battery Production	
<b>Zuwendungsempfänger:</b> Coatema Coating Machinery GmbH	<b>Förderkennzeichen</b> 03XP0414B
<b>Projektleiter*in</b> Thomas Kolbusch <b>Projektkoordinator*innen</b> Kira Grefkes Harmen Rooms	<b>Laufzeit</b> 01.10.2021 - 31.12.2024

### 1. Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse des Teilvorhabens

Ziel des Teilvorhabens der Coatema Coating Machinery GmbH war es sowohl kontinuierliche als auch intermittierende Beschichtungsprozesse für die im Projekt von Projektpartnern in AP1 entwickelten Materialien zu realisieren und die Lasertrocknungsanlage auf Pilotlinien-Maßstab zu skalieren. Hierfür wurden basierend auf computergestützten Simulationen maßgeschneiderte Breitschlitzdüsen für die neuen Materialien entwickelt, validiert und geeignete Prozessparameter für die kontinuierliche und intermittierende Beschichtung erarbeitet. Für die besonderen Anforderungen kontinuierlicher und intermittierender Beschichtungsprozesse wurde eine neuartige Prototypen-Beschichtungseinheit konstruiert und an der Click&Coat® basierten Pilotline im Coatema eigenen Technikum integriert. Zur Umsetzung des Projektdemonstrators und zur Skalierung der Lasertrocknungsanlage auf Pilotlinien-Maßstab wurde insbesondere in Zusammenarbeit mit den Partnern Laserline, Optris und ILT eine speziell auf die Lasertrocknung ausgerichtete modulare Prototypentrocknungseinheit entwickelt und im Vergleich zu marktüblichen Trocknungstechnologien erprobt.

Fokus des **AP1** war die Materialentwicklung im Sinne einer anwendungsspezifische Rezepturformulierung für eine laserbasierte Prozessierung. Die Beteiligung Coatemas beinhaltete die Mitarbeit bei der Festlegung und Bewertung der Einflussfaktoren auf den Trocknungsprozess sowie bei der Festlegung von Key Performance Indicators (KPIs) und Nutzeranforderungen hinsichtlich Anlage und Produkt.

In **UAP1.1** hat Coatema an der Identifikation anlagen- und werkstoffseitiger Einflussfaktoren für die Materialkonzeptionierung und zur Spezifizierung der Systemanforderungen für die Lasertrocknungs- und Beschichtungseinheit mitgewirkt. Anlagenseitige Einflussfaktoren sind u.a. die Laserintensität, Trocknungsdauer und der Luftmassentransport durch die Prozessabsaugung. Als werkstoffseitige Einflussfaktoren sind u.a. Beschichtungsdicke, Benetzungsverhalten und rheologische Eigenschaften der wässrigen Batterie-Pasten zu nennen.

In **UAP 1.2** wurde der Projektpartner PEM bei der Definition der KPIs und Nutzungsanforderungen für die Anlagentechnik unterstützt. Werkstoffseitige Beispiele sind u.a. der Restfeuchtegehalt, die Porosität oder die Homogenität der Beschichtung. Anlagenseitige Beispiele sind Trocknungszeiten oder Bandgeschwindigkeiten. Coatemas Tätigkeiten in **UAP 1.3** und **UAP 1.4** waren beratender Natur zur Unterstützung der Arbeiten in den jeweiligen UAPs.

Das **AP2** widmete sich der Konzeptionierung und Entwicklung des skalierbaren Lasertrocknungsverfahrens und des angepassten Absaugkonzepts. Grundvoraussetzung ist ein geeigneter Beschichtungsprozess, der im Sinne der Hochskalierung auf größere Beschichtungsbreiten und höhere Prozessgeschwindigkeiten angepasst ist. Coatema entwickelte und optimierte den Beschichtungsprozess in **UAP 2.4** mit Einbezug sowohl von kontinuierlichen als auch von intermittierenden Beschichtungskonzepten. Der Fokus der Optimierung lag in der Verbesserung der Filmhomogenität und Verringerung der Defektdichte. Bei der intermittierenden Beschichtung sollte die Qualität der Kanten verbessert werden. Bei der kontinuierlichen Beschichtung, wurde auf erhöhte Homogenität sowie die Reduzierung von Randdefekten in der Beschichtung abgezielt. In **UAP 2.5** war Coatema in beratender Natur tätig und unterstützte die Arbeiten für die Erstellung des Absaugkonzeptes für den Projektpartner ILT.

Zur in **UAP 2.4.1** angestrebten Entwicklung und Optimierung von kontinuierlichen Beschichtungsprozessen fand zunächst eine umfassende strömungsmechanische Optimierung der Schlitzdüsengeometrie statt. Basierend auf der rheologischen Analyse der in AP1 entwickelten Batterie-Slurry-Rezeptur wurden numerische strömungsmechanische Modellierungen und Simulationen durchgeführt (CFD: Computational Fluid Dynamics). Anhand dieser Simulationen wurde ein finales 2D und 3D Beschichtungsfenster (coating window) für die Beschichtungsbreiten 100 mm, 300 mm und 500 mm erstellt, sowie speziell auf die Batterie-Slurry-Rezeptur zugeschnittene Düsen dieser Arbeitsbreiten konstruiert und angefertigt.

Im Folgenden soll auf die strömungsmechanische Optimierung der Schlitzdüsengeometrie eingegangen und die zentralen Aspekte der angewandten numerischen Simulationen zur Optimierung der Schlitzdüsenkonfiguration betrachtet werden. Das Ziel dieses Optimierungsschritts war die Entwicklung eines effizienten Schlitzdüsendesigns, das gleichmäßige Beschichtungen von Anoden-Batterie-Slurry auf Kupfersubstraten gewährleistet. Das Projekt zielte hierbei speziell auf Beschichtungsbreiten von 160 mm, 300 mm und 500 mm mit einer gewünschten Nassbeschichtungsdicke von bis zu 250  $\mu\text{m}$  ab.

Eine detaillierte rheologische Charakterisierung des Batterie-Slurrys war notwendig, um ein adäquates Flüssigkeitsmodell zu wählen und das CFD-Modell zu erstellen. Die rheologische Analyse des Slurry-Materials zeigte ein nicht-newtonsches Verhalten, wobei die Viskosität erheblich von der Scherrate abhing. Das Verständnis dieser rheologischen Eigenschaften war entscheidend, da sie sich direkt auf das Fließverhalten in der Schlitzdüse und die daraus resultierende Beschichtungsqualität auswirkten.

Basierend auf den rheologischen Daten wurde ein CFD-Modell des Schlitzdüsensystems erstellt, der Modellierungsprozess umfasste folgende wichtige Schritte:

- **Definition der Geometrie:** Für die vorliegenden mittels Potenzgesetz beschreibbaren nicht-newtonschen Flüssigkeiten (Power-Law-Fluids) wurde das ursprüngliche Design der Schlitzdüse anhand der analytischen Lösung der Flüssigkeitsströmung in der inneren Kammer festgelegt. Die starke Scherabhängigkeit des Batterie-Slurrys verursacht einen starken Einschnürungseffekt, der wiederum zu einer starken Ungleichmäßigkeit des Ausflusses führt. Um dieses Problem zu verringern, kann ein Zweikammerdesign verwendet werden, bei der nach der ersten Verteilerkammer eine zweite Kammer eingebaut wird.

Diese dient als Puffer, um den Abfluss von Nichtkonformitäten zu kompensieren. Zur Feinabstimmung des ursprünglichen Entwurfs und zur Optimierung der relevanten Entwurfparameter auf die verwendete Batterie-Paste, wurden CFD-Simulationen mit COMSOL Multiphysics erstellt. Ziel war es, ein besseres Strömungsmanagement zu ermöglichen und scherungsbedingte Schwankungen im Beschichtungsprozess zu minimieren.

- **Netzgenerierung:** Es wurde ein feines Netz erzeugt, insbesondere im Bereich der engen Schlitz. Diese Verfeinerung des Netzes war entscheidend, um die Strömungsdynamik und die Schereigenschaften des Slurrys genau zu erfassen.
- **Geltende Gleichungen:** Die CFD-Simulationen basierten auf den Navier-Stokes-Gleichungen (laminare Strömung), die für inkompressible Strömungen angepasst und auf die nicht-newtonschen (Power-Law-) Eigenschaften des Slurrys zugeschnitten wurden. Dieser Ansatz ermöglichte eine realistische Darstellung des Flüssigkeitsverhaltens unter verschiedenen Betriebsbedingungen.
- **Randbedingungen:** Es wurden geeignete Randbedingungen angewandt, um reale Betriebszenarien zu simulieren. Darunter zählen Einlassgeschwindigkeiten, die für die jeweilige Schlitzdüsenbreite repräsentativ sind, die maximale Beschichtungsgeschwindigkeit von 30 m/min, eine Beschichtungsdicke von 250  $\mu\text{m}$  und drucklose Auslassbedingungen. Um den numerischen Aufwand und die erforderliche Rechenleistung zu reduzieren, wurde die Hälfte des Strömungsbereichs mit einer symmetrischen Randbedingung simuliert.

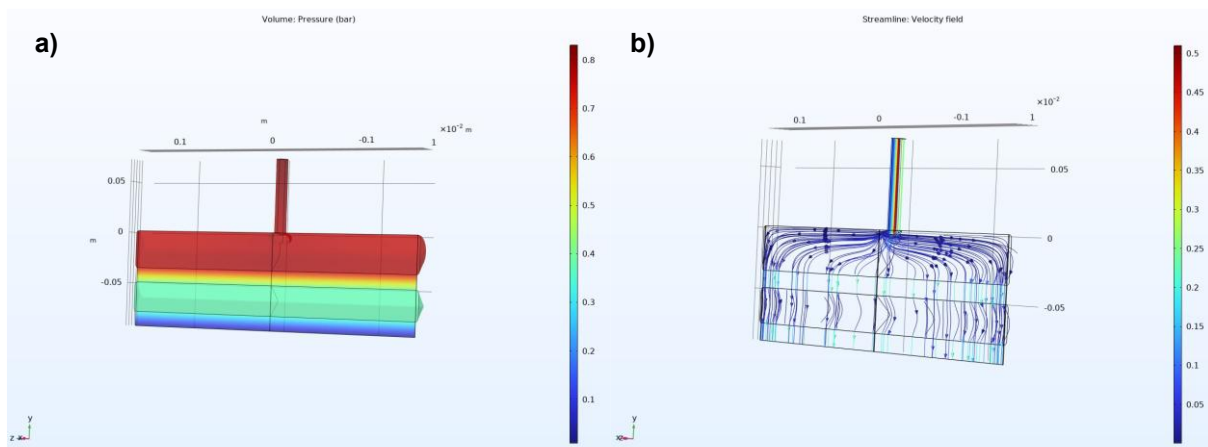


Abbildung 1: Simulation des a) Druckprofils und b) Strömungsverhaltens der 300mm Doppelkammer-Schlitzdüse.

Im weiteren Optimierungsprozess lag der Fokus auf folgenden Aspekten des Schlitzdüsendesigns:

- **Doppelkammer-Konfiguration:** Diese Konfiguration hat eine verbesserte Strömungsgleichmäßigkeit und reduzierte Druckabfälle (siehe Abb.1) für die spezifischen rheologischen Eigenschaften der Suspension gezeigt. Die Designs wurden darauf ausgelegt bei der angestrebten maximalen Beschichtungsgeschwindigkeit von 30 m/min effizient zu arbeiten und gleichmäßige Beschichtungen mit einer Dicke von bis zu 250  $\mu\text{m}$  zu produzieren.
- **Kammerform und -größe:** Die Abmessungen und Form der inneren Kammern wurden iterativ basierend auf den rheologischen Eigenschaften der Suspension optimiert. Verschiedene Geometrien wurden getestet, um die Konfiguration zu bestimmen, die Totzonen (Zonen innerhalb der Breitschlitzdüsenkammer, in denen keine Scherkraft mehr wirkt) minimiert, eine

gleichmäßige Strömungsverteilung fördert und gleichzeitig sicherstellt, dass der Druck bei hohen Beschichtungsgeschwindigkeiten den Maximalwert von 2 Bar nicht überschreitet.

- **Düsenlippen-Design:** Anpassungen wurden auch an der Düsengeometrie (siehe Abb. 2) vorgenommen, um eine konstante Durchflussrate über die gesamte Beschichtungsbreite zu gewährleisten. Dies ist relevant bei hohen Beschichtungsgeschwindigkeiten, aufgrund des stark scherverdünnenden Verhaltens der Suspension.

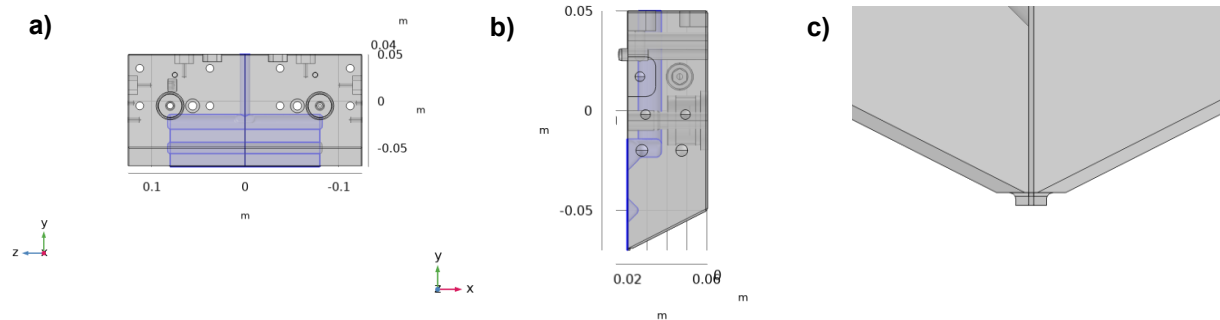


Abbildung 2: a) Seitenansicht und b) Querschnittsansicht des Strömungsbereichs in der Schlitzdüse. c) Detail der Querschnittsansicht der Lippengeometrie der Schlitzdüse zur Verbesserung der Meniskusstabilität.

Die CFD-Simulationen lieferten wertvolle Einblicke in die Leistung der optimierten Schlitzdüsen-Designs. Zu den wichtigsten Erkenntnissen gehörten:

- **Strömungsgleichmäßigkeit:** Die optimierten Radien der ersten und zweiten Kammer wurden für verschiedene Beschichtungsbreiten ermittelt. Für Beschichtungsbreiten von 160 mm, 300 mm und 500 mm wurden optimale Radien von jeweils 6 mm, 8 mm und 8 mm gefunden. Diese optimierten Designs zeigten eine deutlich verbesserte Strömungsgleichmäßigkeit über alle Beschichtungsbreiten, wie exemplarisch in Abb. 3 für die 500mm Beschichtungsbreite dargestellt ist. Die Doppelkammer-Konfiguration erwies sich als sehr effektiv bei der Verminderung von Schervervariationen, was zu einem gleichmäßigeren Ausströmungsmuster führte.
- **Druckabfallreduzierung:** Die optimierten Kammerkonfigurationen und geeigneten Shim-Größen für die Flüssigkeit stellen sicher, dass der Innendruck der Schlitzdüse auch bei maximaler Beschichtungsgeschwindigkeit von 30 m/min unter dem kritischen Schwellenwert von 2 Bar bleibt, (siehe Abb.1a). Dieses Druckmanagement ist entscheidend für die Aufrechterhaltung der Prozessstabilität und die Vermeidung potenzieller Geräteschäden oder Beschichtungsfehler, die mit übermäßigen Innendrücken verbunden sind.
- **Beschichtungsdicken-Konsistenz:** Die Simulationen prognostizierten eine Variation der Beschichtungsdicke von weniger als  $\pm 2\%$  über die Breite, was innerhalb der akzeptablen Grenzen für eine hochwertige Batterieproduktion liegt.
- **Analyse des Beschichtungsfensters:** Ein kritischer Aspekt der Optimierung war die Berechnung des Beschichtungsfensters für die Schlitzdüsen. Diese Analyse berücksichtigte die maximale Beschichtungsgeschwindigkeit von 30 m/min und die erforderliche Beschichtungsdicke von 250  $\mu\text{m}$ . Die umfassende Analyse ermittelte den optimalen Bereich des Beschichtungsspalts, um gleichzeitig die Beschichtungsstabilität zu gewährleisten und häufige Defekte zu minimieren (siehe Abb. 4). Dieser optimierte Bereich verhindert effektiv Probleme wie Meniskusschwellung, Lufteinschlüsse und reduziert die Randerhöhung, wodurch die Gesamtqualität der Beschichtung verbessert wird. Durch die Identifizierung dieses idealen

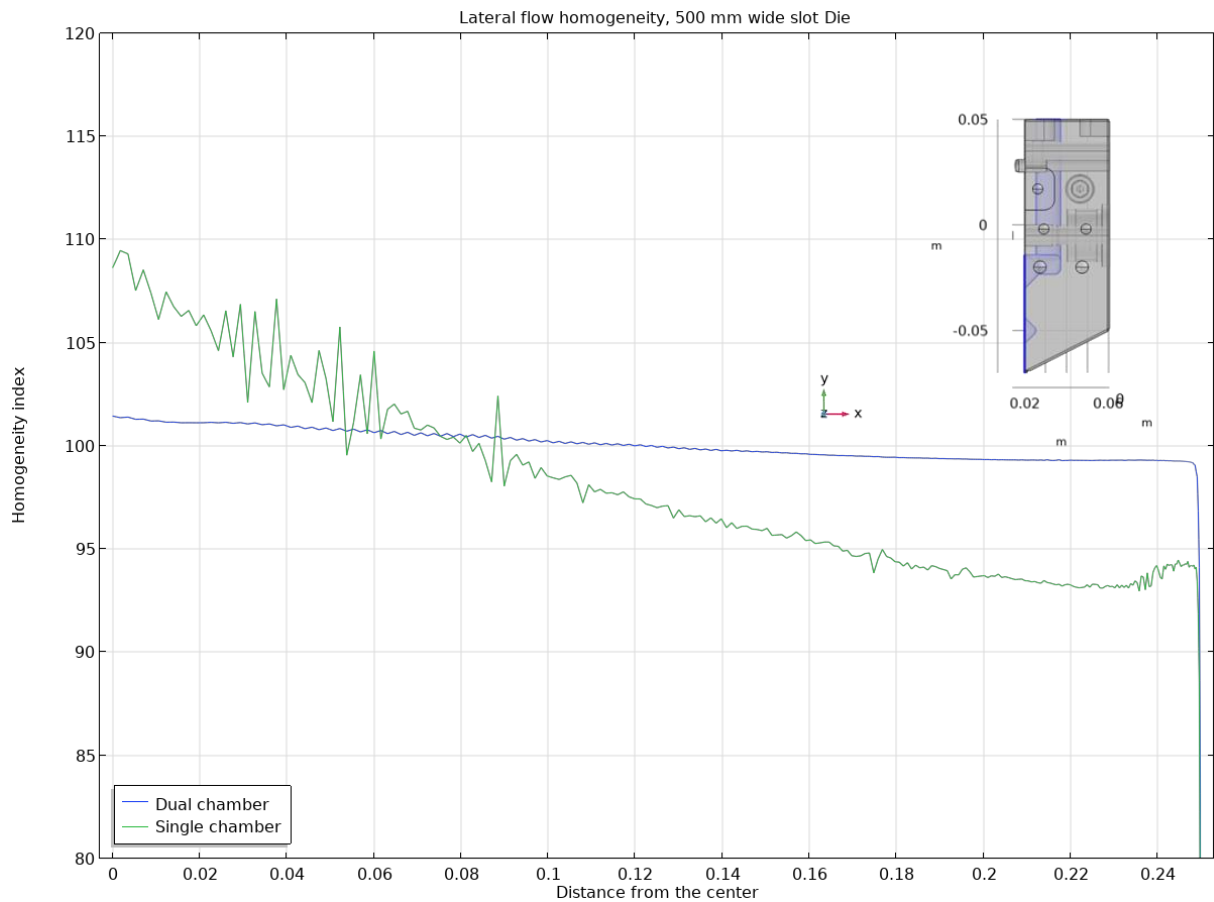


Abbildung 3: Die Strömungshomogenität wird durch die Verwendung einer Schlitzdüse mit Doppelkammerdesign verbessert. Gezeigt wird hier eine Simulation der halben Geometrie ausgehend von der Kammermitte.

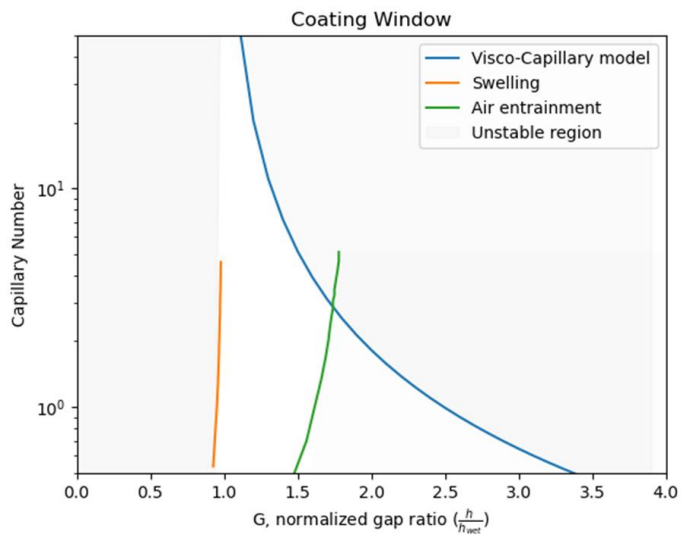


Abbildung 4: Stabile und instabile Region des „Coating window“ für die anwendungsspezifischen Beschichtungsparameter.

Spaltbereichs (siehe Abb. 5) kann der Prozess ein empfindliches Gleichgewicht zwischen der Erreichung einer gleichmäßigen Beschichtungsverteilung und der Vermeidung von Oberflächenunvollkommenheiten aufrechterhalten.

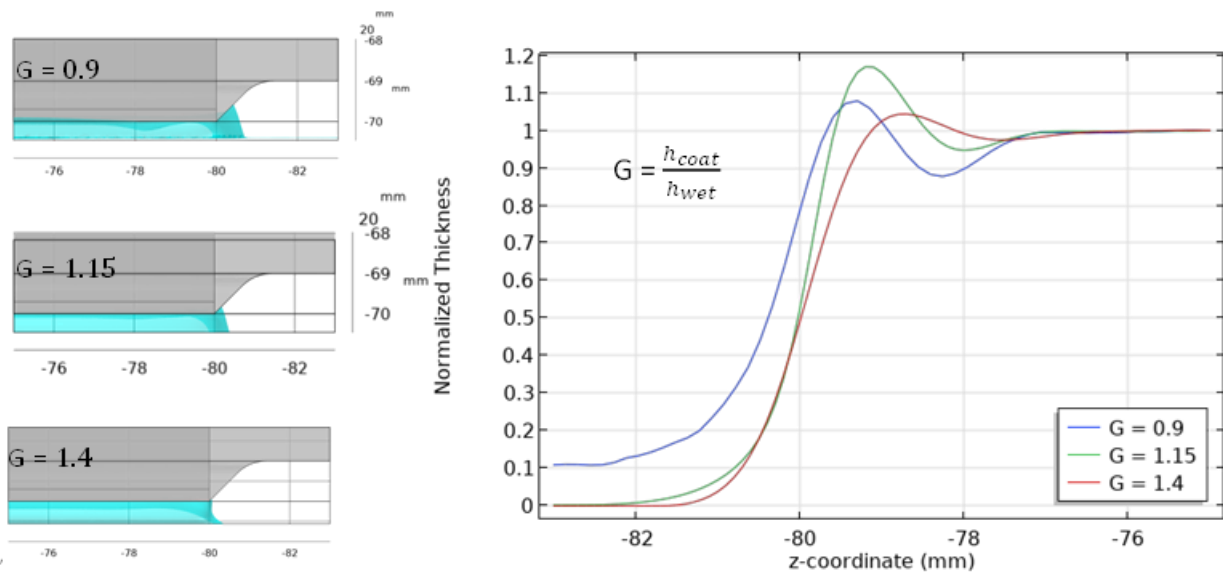


Abbildung 5: Optimierung zur Reduzierung von Kantenfehlern durch Anpassung des Beschichtungspalts.

Zusammenfassend hat die umfassende CFD-Optimierung des Schlitzdüsendesigns für die Batteriebeschichtung vielversprechende Ergebnisse geliefert. Die Doppelkammer-Konfiguration, die auf die spezifischen rheologischen Eigenschaften der Suspension zugeschnitten ist, hat eine verbesserte Strömungsgleichmäßigkeit und reduzierte Druckabfälle gezeigt. Die Designs wurden darauf ausgelegt bei der maximal angestrebten Beschichtungsgeschwindigkeit von 30 m/min effizient zu arbeiten und gleichmäßige Beschichtungen mit einer Dicke von bis zu 250  $\mu\text{m}$  zu produzieren.

In **UUAP 2.4.2** wurden für die Entwicklung und Optimierung von intermittierenden Beschichtungsprozessen Beschichtungsversuche im Coatema R&D Center durchgeführt. Hierzu wurden eine Dummy Batteriepaste und PVA-Lösung, vor Beginn des UUAPs beschichtet, um Faktoren wie die Abrisskante sowie Benetzung zu evaluieren. Aufgrund des hohen Arbeitsaufwandes in den anderen Arbeitspaketen wurde der Fokus im Verlauf des Projekts primär auf die Trocknung kontinuierlicher Beschichtungen gesetzt, zumal eine gute Übertragbarkeit der Ergebnisse der Trocknung kontinuierlicher auf intermittierende Beschichtungen zu erwarten ist.

In **UUAP 2.4.3** lag der Fokus auf der Entwicklung der Prototypen Beschichtungseinheit, die für produktionstechnisch relevante Geschwindigkeiten von bis zu 100 m/min geeignet ist und Beschichtungsbreiten von bis zu 550 mm ermöglicht. Coatema hat das neue Prototypenbeschichtungsmodul für die Click&Coat® basierte Pilotline Linecoater entwickelt und integriert (siehe Abb. 6)

Besondere Merkmale der Neuentwicklung sind hierbei:

- Variabilität in der Beschichtungsposition, so wird beispielsweise die 8 Uhr oder 9 Uhr Position typischerweise für viele Batteriematerialien verwendet
- Eignung für sowohl intermittierende als auch kontinuierliche Schlitzdüsenbeschichtung. Zentrale Aufgabe hierbei war die Integration der für die intermittierende Beschichtung benötigten Hardware, u.a. der zum Abfahren der Düse benötigte Lineartisch, eine 500 mm Piezo-Klappdüse oder 500 mm Doppelkammerdüse mit Piezopumpe
- Kompatibilität mit der bestehenden modularen Click&Coat® Pilotline und der nachgelagerten Prototypen Lasertrocknungseinheit
- Auslegung des Moduls auf eine maximale Beschichtungsbreite von 550 mm und damit die Berücksichtigung besonders schwerer Breitschlitzdüsen. Zudem optimierte Handhabung

durch automatisierte Spaltverstellung, geführte Düsenpositionierung und Kranvorrichtung für Ein- und Ausbau

- Implementierung von Flow-Elementen, die Verwendung von gekapselten Lagern, Abschirmung der Motoren und anderer beweglicher Teile für die Vermeidung eines Kurzschlusses. Optimierung der Bahnführung zur Reduktion der Partikelbelastung und damit einhergehend von Beschichtungsdefekten
- Präzise Verstellbarkeit und Anpassung der motorgesteuerten Komponenten auf hohe Prozessgeschwindigkeiten
- Optimierte Warenführung durch Umlenkwalzen und Bahnspannungskontrolle für sensible Kupfer- / oder Aluminiumfolien.
- Einbau von Lichtsensoren für die Überwachung von Prozessparametern wie z.B. Düsendruck; Durchfluss; Düsenpalt

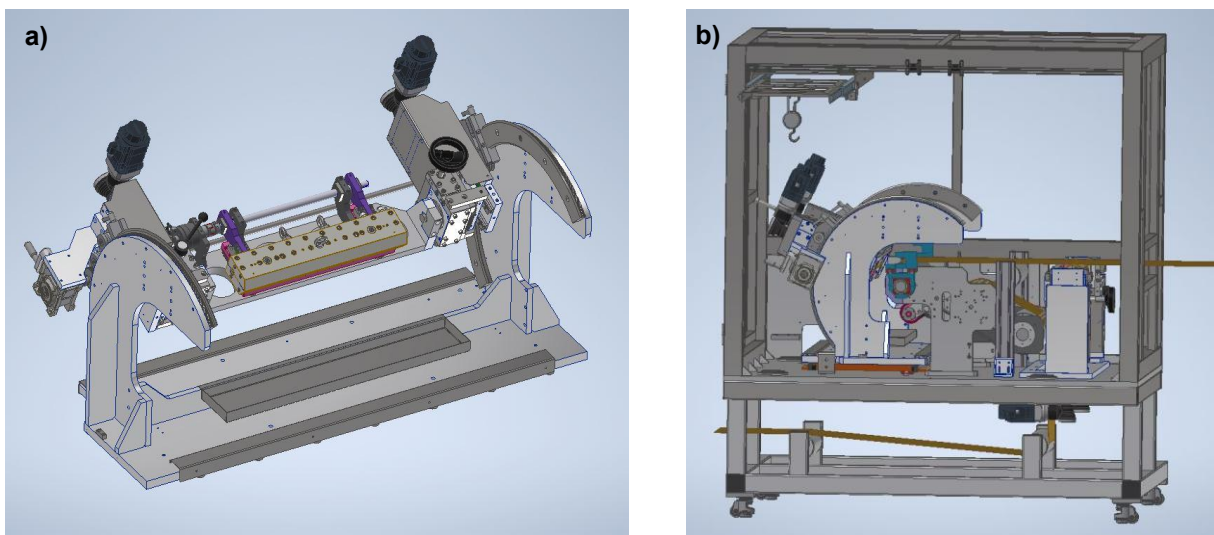


Abbildung 62: Prototypen-Beschichtungseinheit a) in Detail Ansicht und b) komplettes Modul zur Integration in die Pilotline.

In **AP3** standen Prozessentwicklung und Proof-of-Concept im Fokus. Seitens Coatema wurde die Entwicklung des Anlagenkonzepts für die industrielle Lasertrocknung und eine entsprechende Skalierung des Prozesses auf eine Bahngeschwindigkeit von bis zu 30 m/min bei einer Beschichtungsbreite von bis zu 500 mm thematisiert. Um die Lasertrocknung in diesen Pilotprozess zu integrieren, wurde ein Upgrade der Pilotanlage bei Coatema durchgeführt. Dazu wurde eine speziell auf die Lasertrocknung ausgerichtete modulare Prototypenlaser-Trocknungseinheit entwickelt, wobei die Partner Laserline, Optris und ILT beratend zur Seite standen.

In **UAP 3.3** wurde entsprechend die Konzeptionierung, Realisierung und Qualifizierung des Demonstrators durchgeführt. Hierbei wurde seitens Coatema in **UAP3.3.1** die Spezifizierung und Umsetzung der Prototypen-Lasertrocknungseinheit durchgeführt. Im Folgenden sollen die zentralen Punkte, wie die Erarbeitung eines Lasersicherheitskonzepts, die Konzeptionierung und Umsetzung eines neuartigen, anwendungsspezifischen Luftkonzepts, sowie die Integration der zwei Lasereinheiten, der thermografischen Kameras und die regelungstechnische Einbettung der Einzelkomponenten in die Click&Coat® basierte Pilotlinie genauer betrachtet werden:

- Zur Gewährleistung eines sicheren Betriebs der Lasertrockeneinheit in offenen Fabrikhallen wurde in Zusammenarbeit mit einem externen sowie dem internen Sicherheitsingenieur und

in Absprache mit den Projektpartnern, ein Lasersicherheitskonzept für die neuentwickelte Lasertrocknungseinheit erarbeitet und umgesetzt. Teil dieses Sicherheitskonzeptes waren unter anderem, die Separation elektronischer Teilkomponenten sowie Wärmequellen vom explosionsfähigen Prozessraum; Steuerrungstechnische Schutzmaßnahmen wie elektrifizierte Türverriegelungen; Integration von Laserschutztüren und -gläsern; Temperaturüberwachung des Prozesses mit direkter Kommunikation zwischen Laser und Anlage (Thermokamera-Regelsystems).

- Für das Absaugungssystem wurden die Ergebnisse des Partners ILT aus UAP 2.5 als Grundlage genutzt. Für den entwickelten Prozess im Pilotmaßstab wurde dieses weiter angepasst und mittels CFD-Simulation optimiert. Zentral ist hierbei die Gewährleistung eines ausreichenden Massentransports. Coatema hat mathematische Modellierungen und CFD-Simulationen zur Auslegung der Trocknergeometrie, des Absaugsystems sowie zur Optimierung der Luftströmung, der Abschätzung des benötigten Massetransports und des Energietransfers durchgeführt. Der auf das Luftkonzept spezialisierte Trockner wurde in einem iterativen Designprozess angepasst und in die Prototypen-Beschichtungseinheit integriert (siehe Abb.7). Die Auslegung der Anschlüsse für Zu- und Abluft ist im Sinne der Modularität so gewählt worden, dass bei Bedarf die Zuluft auch entgegen der Bahnlaufriichtung eingespeist und die Abluft in Bahnlaufriichtung entfernt werden kann (ursprüngliches Modell des Partners ILT).
- Basierend auf den Ergebnissen von UAP 3.2 wurde die Regelungstechnik mit Thermographie-Kamera in das Lasertrocknermodul integriert, diese dient zur Überwachung des Prozesses und der automatisierten Abschaltung im Falle einer Überhitzung des Messbereichs über einen vordefinierten Temperaturwert. Zudem besteht die Möglichkeit den Prozess über eine Regelung der Substrat Zieltemperatur zu steuern, dies dient als Alternative zur der auf der prozentualen Laserleistung basierten Regelung des Prozesses. Zur Charakterisierung des Trocknungsprozesses wurde der Prototypentrockner außerdem mit entsprechender Messtechnik, wie beispielsweise Sensoren zur Messung der Temperatur, der Feuchtigkeit und des Volumenstroms, ausgestattet.
- Die von Laserline zur Verfügung gestellten Laser wurden in die modulare Prototypen-Trocknungseinheit integriert. Durch die Integration beider Laserstrahlensysteme konnte das Konzept eines 2-stufigen Heizprofils erprobt und die Übertragbarkeit des Trocknungsprozesses auf einen industriellen Maßstab mit hohen Bahngeschwindigkeiten sichergestellt werden. Beide Lasertrocknungsmodule der Prototypenlasertrocknungseinheit wurden in die Click&Coat® Pilotline im Coatema R&D Center integriert. In der in diesem Projekt angewendeten 2-stufigen Trocknungskonfiguration durchläuft die Warenbahn nach der Beschichtung zunächst den Funktionsmuster Laser mit 8 kW (LDM 8000-100) und anschließend den Entwicklungsmuster Laser mit 16 kW (LDF 16000-100). Im Gegensatz zu konventionellen festen Anlagenkonfigurationen bestehen Click&Coat® Linien aus verschiedenen mobilen Komponenten, die je nach Bedarf durch „aneinander klicken“ hinzugefügt oder ausgetauscht werden können. Dadurch kann die Anlage in verschiedenen Konfigurationen verwendet werden und das Heizprofil entsprechend auch anlagenseitig variiert werden. Auf diesem modularen Konzept, basiert auch das um 180° drehbare Design der integrierten Laser Optiken, welches ermöglicht unterschiedliche Beschichtungsbreiten mit einem Modul abzudecken.

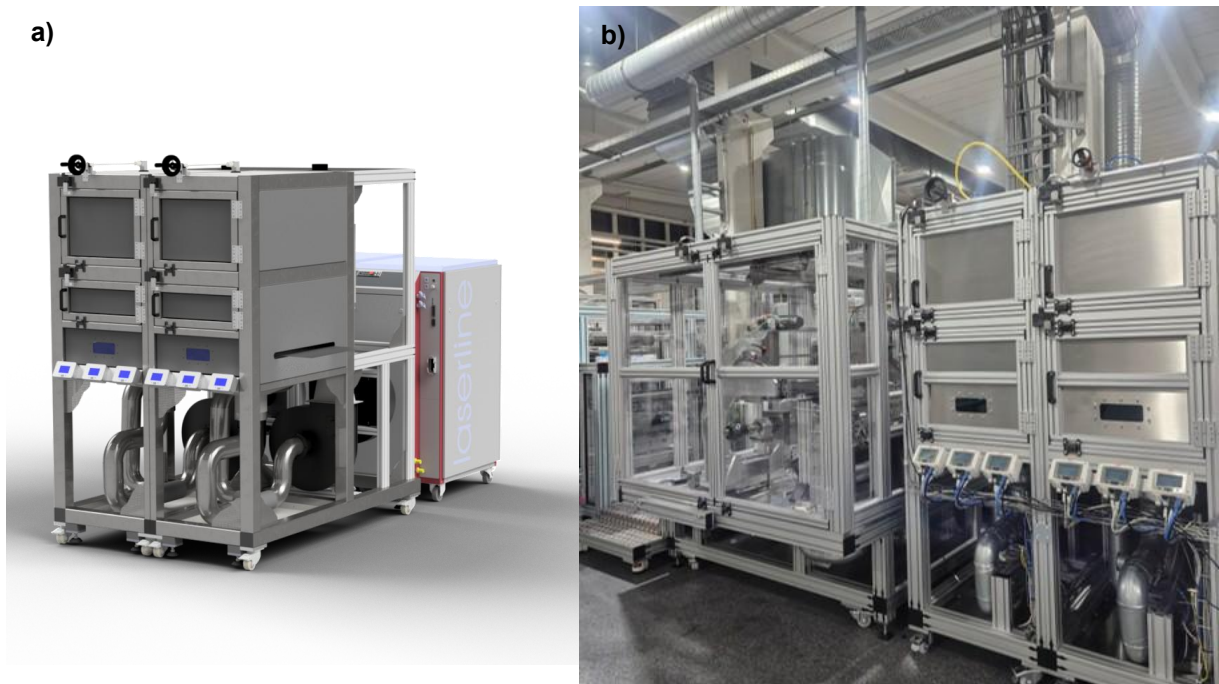


Abbildung 73: Prototypen-Lasertrocknungseinheit in a) Modulansicht mit integriertem 8 und 16 kW Laser und jeweils Spotgrößen von 28cm x 55cm und b) Module im Anschluss an die Beschichtungseinheit integriert in der Pilotanlage.

In **UUAP 3.3.2** wurde die weitere Optimierung und Qualifizierung des Lasertrocknungsprozesses nach erfolgter Integration der Prototypen-Trocknungseinheit sowie der Prototypen-Beschichtungseinheit in die Click&Coat® basierte Pilotline fokussiert. Hierzu wurden Beschichtungs- und Trocknungsversuche durchgeführt.

Bei allen Versuchen wurde die Batterie- Paste nach der von den Partnern bereitgestellten Rezeptur zubereitet. Aufgrund der Neuanschaffung der Exzentrerschneckenpumpe (Netzsch Model: NM021MY02S12R), um die entsprechende Viskosität und geforderte Förderrate abzudecken, waren anfänglich Pumpenversuche notwendig. Hierbei wurde die entsprechende Pumpe zunächst in Betrieb genommen und in Kombination mit einem Druckbehälter getestet. Der Druckbehälter wurde mit 2 Bar beaufschlagt und die Batterie-Paste darin kontinuierlich gerührt. Ziel hinter dieser Konfiguration war die Erzeugung kontinuierlicher Scherkraft, um eine prozessierbare Viskosität zu erreichen. Entgegen der erwarteten Scherverdünnung, wurde allerdings ein Verdickungseffekt der Batterie-Paste beobachtet, der im Diagramm zur Pumpenkalibrierung (siehe

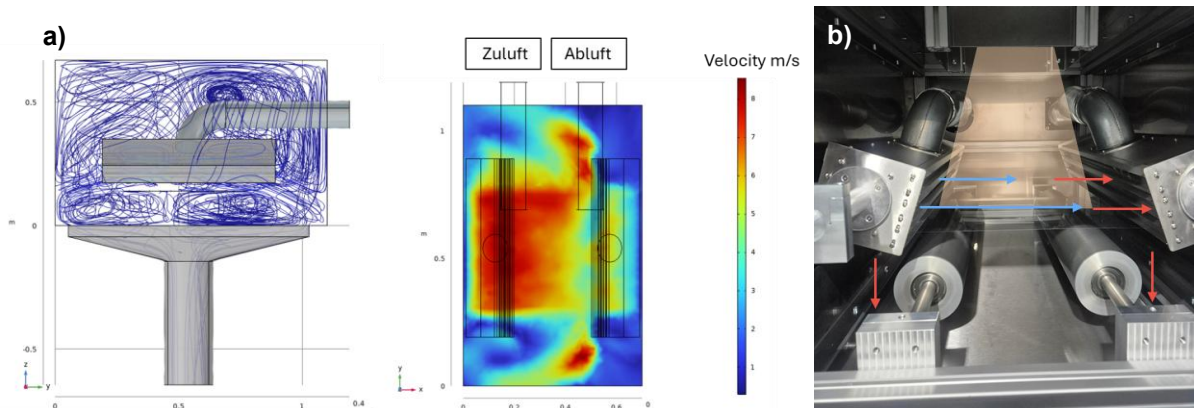


Abbildung 84: Computergestützte Strömungsanalyse der Trocknereinheit für spezifisches Luftkonzept, skizziert in b) mit Zuluft (blaue Pfeile) in Richtung des Bahnlaufs und Abluft entgegen des Bahnlaufs (rote Pfeile).

„pump 1“ in Abb.9) dargestellt ist. Im ursprünglichen Pumpsetup mit Druckbehälter ist das Verhalten der Batterie-Paste nichtlinear in Bezug auf die Pumpenleistung. Wird die Paste jedoch mit einem Trichter direkt in die Pumpe eingespeist, steigt das Fördervolumen linear mit der Pumprate (siehe „pump 2“ in Abb.9). Resultierend aus diesen Versuchen, konnte eine Notwendigkeit der Verwendung eines Druckbehälters in Kombination mit der Pumpe ausgeschlossen werden. Daher wurde diese modifizierte Anordnung bei den nachfolgenden Trocknungsversuchen verwendet.

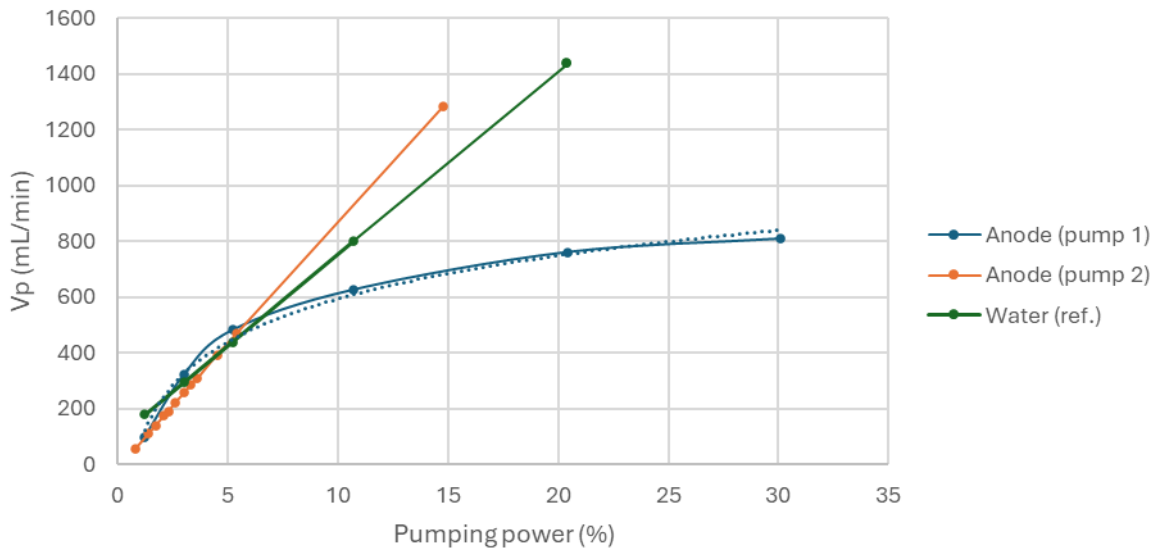


Abbildung 9: Pumpenkalibrierung mit verschiedenen Pumpenkonfigurationen zur Einspeisung der Slurry-Tinte ins Pumpsystem: Slurry-Tinte in Druckbehälter (blau) oder in Trichter (orange) und Wasser (grün) für ein lineares Referenzverhalten.

Zunächst wurde das Lasertrocknungsverfahren mittels 8 und 16 kW-Laser ohne zusätzliche Konvektionstrocknung bei steigenden Bahngeschwindigkeiten untersucht. In Abhängigkeit der Bahngeschwindigkeit ändert sich auch die Verweilzeit der Batteriepaste unter Laserbestrahlung und damit die Energie, die pro Fläche eingebracht wird. Bei gleichbleibender Laserintensität lässt sich diese Dosis über die Bahngeschwindigkeit regulieren, alternativ ist die Laserintensität (10-100%) ein weiterer direkter Steuerungsparameter. Bei der reinen Lasertrocknung konnten zwar bei verschiedenen Bahngeschwindigkeiten (2-7 m/min) trockene Schichten erzeugt werden, aber teils mit schlechter Adhäsion auf dem Kupfersubstrat, was auf eine Zersetzung des Bindemittels im Anodenmaterial hinweist. Auch wurden Beschichtungen mit sogenanntem „Skinning Effekt“ beobachtet, bei denen die Oberfläche zwar trocken erscheint, darunter liegende Schichten aber noch feucht sind. Bei der maximalen Bahngeschwindigkeit (30m/min) war es auch bei maximal angelegter Laserintensität beider Laser nicht möglich eine trockene Beschichtung zu erzeugen. Die Temperaturentwicklung während der Laserbestrahlung der Batterie-Paste wurde mittels IR-Kamera überwacht und über eine Fläche von 20x20cm im Durchschnitt betrachtet (siehe Abb. 10).

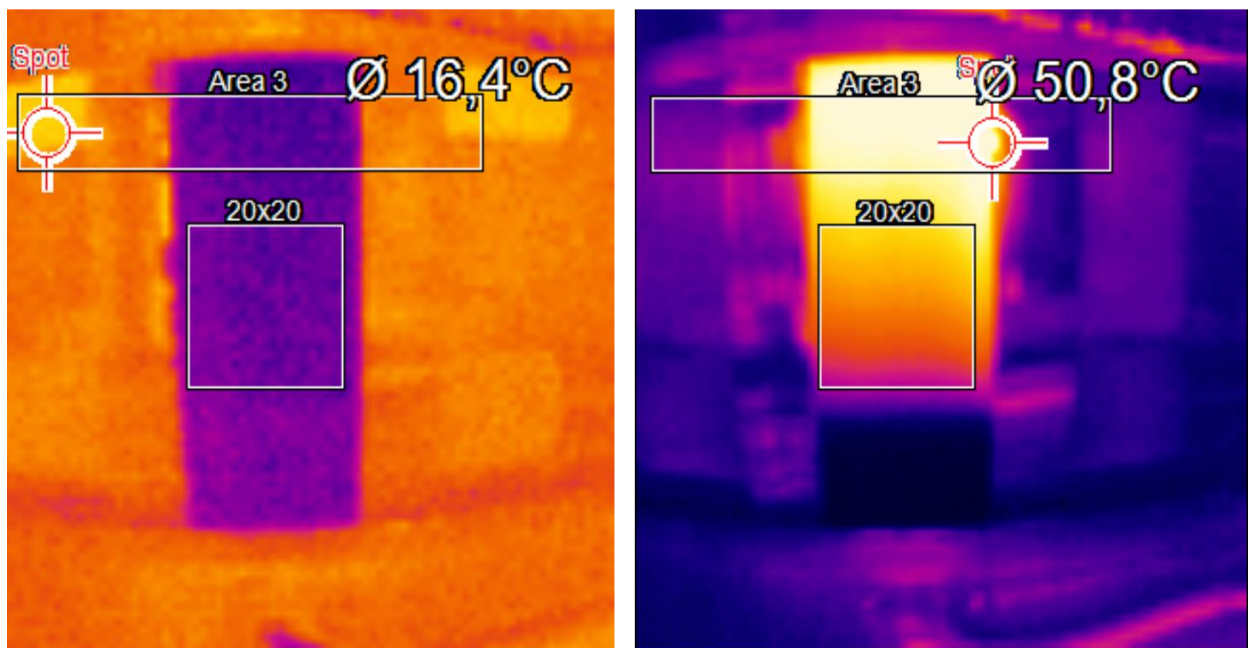


Abbildung 10: Links: IR-Bild der Nassbeschichtung noch ohne aktive Lasertrocknung. Rechts: Zum Vergleich ein IR-Bild einer Nassbeschichtung, die mit einem 8kW-Laser bei 100% Laserleistung und einer Bahngeschwindigkeit von 7m/min aufgeheizt wurde.

Hierbei wurde ein Effekt beobachtet, der für zukünftige steuerungstechnische Prozessoptimierung interessant sein könnte. In Abbildung 11 sind Zeit-Temperatur-Diagramme verschiedener Beschichtungsversuche gezeigt. Die Beschichtung wird zunächst vom 8-kW-Laser und dann vom 16-kW-Laser bestrahlt und erwärmt. Ein starker Temperaturanstieg auf ca.  $140^{\circ}\text{C}$  ist in den Versuchen 12 und 13 zu sehen. Bei diesen Versuchen wurde ein Skinning-Effekt (V12) mit oberflächlich trockener Beschichtung oder eine vollständig trockene Beschichtung (V13) beobachtet. Der Temperaturanstieg deutet darauf hin, dass das gesamte Lösungsmittel von der Oberfläche verdunstet ist und die Strahlung zu einer erheblichen Erwärmung des Materials beiträgt. Die Diagramme zu Versuch 10 zeigen keinen Peak, vermutlich weil die Oberfläche der Beschichtung in diesem Versuch nicht trocken war. Die bei der reinen Lasertrocknung beobachtete Problematik von Beschichtungen mit schwacher Adhäsion, Skinning-Effekten und zu starkem Erhitzen im Trocknungsprozess unterstreichen die Bedeutung des Hybrid-Ansatzes, bei dem die Lasertrocknung eine intensive Vortrocknung darstellt und sich eine finale Trocknungsphase durch Konvektionstrocknung anschließt und damit ebenfalls zu einer deutlichen Reduktion konventioneller Trocknerstrecken im Batteriebereich darstellt. In weiteren Versuchsreihen wurde daher die hybride Lasertrocknung im Vergleich zur reinen Laser- und Konvektionstrocknung erprobt. Die Reproduzierbarkeit der Versuchsergebnisse ist allerdings durch prozessinterne, noch nicht identifizierte Einflussfaktoren noch nicht in dem Maße gegeben, dass sich valide Aussagen über optimale Parameter zur Trocknungsmethode treffen ließen. Hier besteht weiterer Forschungsbedarf in Form einer systematischen Analyse möglicher Einflussfaktoren auf die Reproduzierbarkeit des Prozesses.

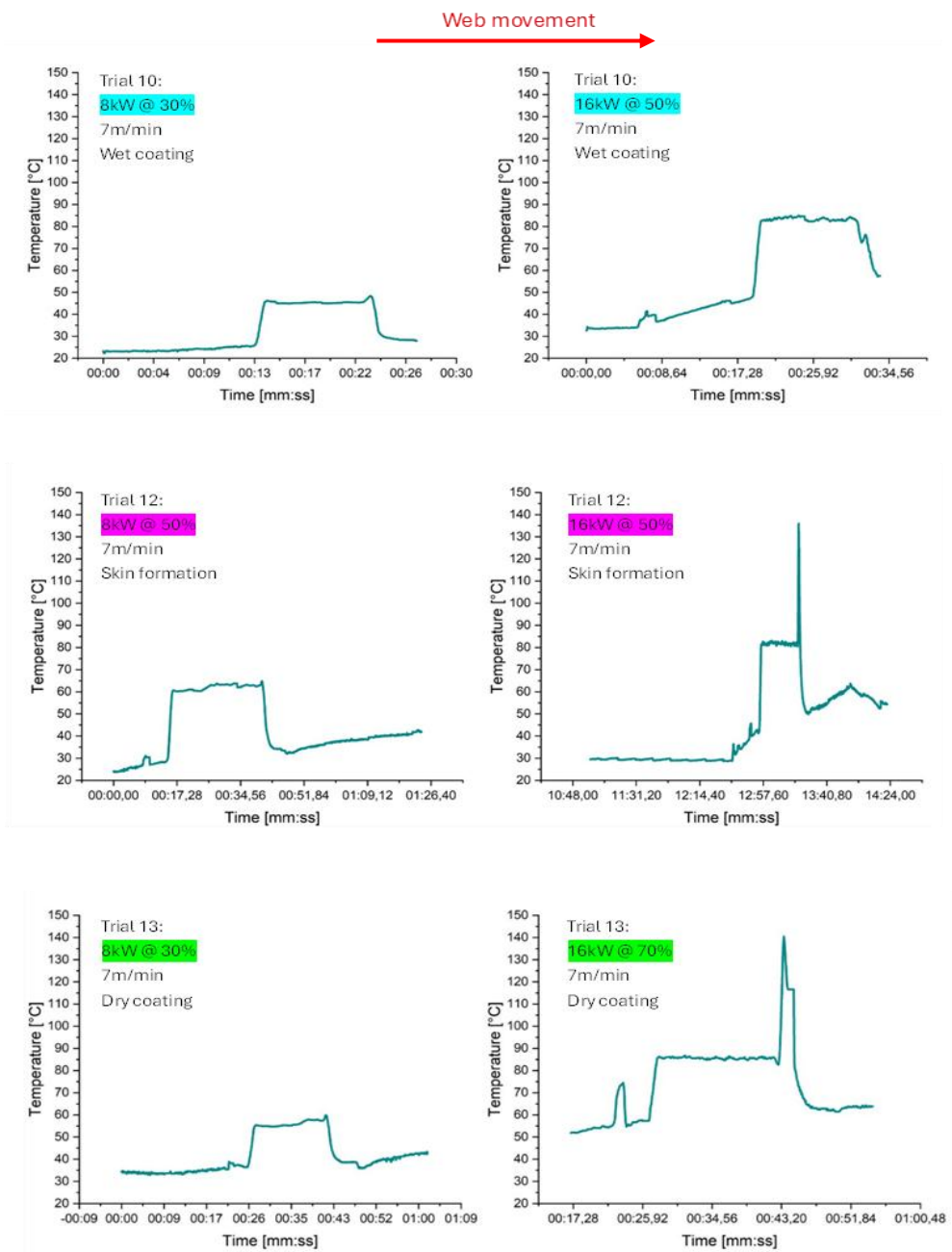


Abbildung 11: Zeit-Temperatur-Diagramme für die Versuche 10, 12 und 13. Jedes Diagramm zeigt die Temperatur der Beschichtung dar, die unter dem 8-kW-Laser (links) und dem 16-kW-Laser (rechts) durchläuft. Der typische höhere Peak (~140°C) in den Versuchen 12 und 13 deutet darauf hin, dass das gesamte Lösungsmittel von der Oberfläche verdunstet ist und die Strahlung zu einer erheblichen Erwärmung des Materials beiträgt.

Ziel des **UUAP 3.3.3** war die Konzeptionierung einer Produktionsanlage mit integrierter Lasertrocknung. Durch die erfolgreiche Implementierung des Beschichtungsmoduls sowie der modularen Lasertrocknungseinheit in das Pilotanlagenkonzept stellt dies eine für die Lithium-Ionen-Batterieherstellung mittels Schlitzdüsenbeschichtung und hybrider Lasertrocknung qualifizierte Anlagenlösung auf Basis der Click&Coat® Plattform dar. In Abbildung 12 sowie dem Anhang ist das derzeitige Anlagenkonzept für eine Beschichtungsbreite von 500 mm dargestellt. Weitere technische Daten sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Das Anlagenkonzept umfasst folgende Module ausgehend von der Richtung der Warenbahn:

- Abwickler für das Substrat (Kupfer-/Aluminiumfolie), hier in der Ausführung als Wendewickler für einen automatischen Rollenwechsel in Produktionsgeschwindigkeit inkl. Splice-Vorgang
- Vorbehandlungsmodul mit Corona-Einheit, Bahnreinigung und Zugwerk
- Arbeitspodest, Zugang zu Beschichtungsmodul
- Beschichtungsmodul, zur kontinuierlichen und intermittierenden Beschichtung mittels Breitschlitzdüse (600mm), Beschichtungswalze durch Wassertemperiergerät bis 90 °C temperierbar, mit winkelverstellbarem Aufnahmebalken für die Beschichtungsdüse, sowie motorischer Spalt- und Seitenverstellung ausgestattet, eine modulare Bauweise ermöglicht das einfache Herausnehmen des Beschichtungsmoduls zur Reinigung bzw. zu einem möglichen Austausch gegen ein alternatives Auftragssystem, inkl. integrierter Messwalze
- Lasertrocknungseinheiten
- Fünf Konvektionstrockner mit je 1,5 m Trocknermodule (7,5 m Trocknerlänge), maximale Temperatur 180°C
- Kühl- und Zugwerk, ausgeführt als Doppelmantel-Walzen mit Drehdurchführung zum Anschluss an einen vorhandenen Kühlkreislauf bzw. eine Rückkühlmaschine
- Aufwickler für das Produkt, hier in der Ausführung als Wendewickler für einen automatischen Rollenwechsel inkl. Splice-Vorgang, mit Mess- und Regelwalze zur Geschwindigkeits- und Zugspannungskontrolle

Um eine unterbrechungsfreie Produktion zu gewährleisten, werden bei Produktionsanlagen häufig automatisch arbeitende Wendewickler mit je 2 Wickelstellen als Ab- und Aufwickler eingesetzt. Der Rollenwechsel erfolgt automatisch mit einem entsprechenden automatisierten Splice-Vorgang. Alternativ dazu können Produktionsanlagen mit nur einem Wickler arbeiten und zum Rollenwechsel wird die Produktion kurz gestoppt und mittels manuellem Splice-Vorgang ein neuer Wickel eingesetzt. Das unterschiedliche Anlagenkonzept spiegelt sich in der Anschaffung wieder:

Die Investitionskosten mit automatischen Wendewicklern liegen bei ca. 3.200.000,00 €. Eine Produktionsanlage mit einer einfacheren Ausführung mit regulärem Ab- und Aufwicklern belaufen sich die Kosten auf ca. 2.400.000,00 €. In dieser Kostenaufstellung wird bezüglich der Lasertrocknungseinheit lediglich die Kabine zur Lasertrocknung mit allen Luftführungen berücksichtigt, jedoch exklusive der eigentlichen Lasereinheiten und Laseroptiken der Fa. Laserline. Die Investition dieser Module sind vom Projektpartner zu benennen.

Die Modulauswahl und Konzeptionierung der Anlage für die Beschichtungsbreite 500 mm lässt sich entsprechend auf eine Beschichtungsbreite von 1100 mm übertragen. Je nach Ausführung (Ab- und Aufwickelmodule mit oder ohne Wendewickler) sind mit Kosten von ca. 4.200.000 € bzw. ca. 3.200.000 € zu rechnen. Auch hier sind die Lasereinheiten und Laseroptiken nicht in der Kalkulation enthalten.

Technische Daten	
Substratbreite	Max. 550 mm
Walzenbreite	600 mm
Beschichtungsbreite	Max. 500 mm
Geschwindigkeit, mechanisch	0,5 - 100 m/min
Walzendurchmesser:	
-Beschichtungswalze	300 mm
-Umlenkwalzen	120 mm
-Kühlwerk	400 mm
Wickeldurchmesser Wendewickler	80 – 750 mm
Zugspannung	10 – 250 N / Arbeitsbreite
Druckluft	6 Bar benötigt

*Tabelle 1: Ergänzende technische Daten zum Anlagenkonzept 500 mm Beschichtungsbreite*

## 2. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Bezüglich der wichtigsten Positionen des Verwendungsnachweises, den Material- und Personalkosten, sowie den sonstigen unmittelbaren Vorhabenkosten und Reisekosten, sind Abweichungen in Form von sowohl Minder- als auch Mehrbedarf aufgetreten. Die Mehrkosten für Material sind zum einen auf die im Projektzeitraum gestiegenen Materialpreise zurückzuführen, zum anderen kam es zu zusätzlichen Ausgaben in UAP 3.3. durch die im Konsortium beschlossene Neuplanung und Fertigung eines neuen Trocknungsmoduls. Die Mehrkosten für sonstige unmittelbare Vorhabenkosten haben sich durch erhöhte Lizenzkosten für Simulationssoftware ergeben. Der deutliche Minderbedarf für Personal- und Reisekosten basiert auf der personellen Umstrukturierung des Projektteams durch limitierte Ressourcen. Zudem wurde der Bedarf an Personalkosten durch die Nutzung vorhandener Konstruktionsbausteine und effiziente Umsetzung der Aufgaben gesenkt.

## 3. Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Bei der computer-gestützten Schlitzdüsenauslegung wurden wertvolle Erfahrungen in der Handhabung und den zu erwartenden rheologischen Effekten insbesondere wasserbasierter Batterie-Slurries gewonnen, die eine fundierte Grundlage für zukünftige kunden- und anwendungsspezifisch optimierte Schlitzdüsen zur Lithium-Ionen-Batterie Produktion darstellen. Auch hat sich die hohe und nachhaltige Relevanz computer-gestützter Optimierung sowohl für die Schlitzdüsenoptimierung als auch für die Konzipierung von Trocknungsanlagen gezeigt und als essenzieller Bestandteil der forschungsbasierten Arbeit Coatemas etabliert.

Die Prototypen Beschichtungseinheit hat den Automatisierungsgrad der Beschichtungsanlage deutlich erhöht und damit die erreichbare Präzision und Schichtdickenhomogenität gesteigert. In Bezug auf intermittierende Beschichtungen, die mit der Beschichtungseinheit umgesetzt werden können, wird eine langfristige Optimierung des Prozesses angestrebt.

Das im Rahmen des Projekts entwickelte Lasersicherheitskonzept war zwingend notwendig für den Betrieb des Prototypen Lasertrockners im Technikum von Coatema. Hierbei wurden zentrale Aspekte im Umgang mit Lasern gelernt, die für die zukünftige Nutzung und den Ausbau dieser vielversprechenden Technologie auch außerhalb des Kontextes der Lasertrocknung von hohem

Nutzen sind. Das neu entwickelte Luftkonzept der Prototypen Lasertrocknungseinheit kann für zukünftige Projekte zu laserbasierter Trocknung von Beschichtungsgut ohne Limitierung auf Batterieanwendungen als Grundlage für weitere Entwicklungen genutzt werden.

a)                    b)                    c)                    d)                    e)                    f)                    g)                    h)



Abbildung 12: Anlagenkonzept für hybride Lasertrocknung auf Basis der Click&Coat® Plattform. Module: a) Abwickler (Wendewickler) b) Corona-Vorbehandlung und Zugwerk, c) Podest, d) Beschichtungsmodul, e) Lasertrocknungseinheiten, f) Konvektionstrockner, g) Kühl- und Zugwerk, h) Aufwickler (Wendewickler).

#### 4. Während der Laufzeit bekannt gewordene, relevante Ergebnisse Dritter

Die Firma Coatema Coating Machinery GmbH hat keine Kenntnis von für die Durchführung des Vorhabens relevanten, neuen Forschungsergebnissen.

#### 5. Erfolgte und geplante Veröffentlichungen

Im Rahmen des Projekts gab es seitens der Coatema Coating Machinery GmbH folgende Veröffentlichungen:

##### Konferenzbeitrag

Lfd. Nr.	Autoren	Titel	Typ (Poster, Präsentation)	Konferenz/ Tagung	Datum
1	Thomas Kolbusch; VP	LIFT Printing for high viscous materials in combination with laser drying	Präsentation	Techblick, Berlin	Oktober 2024
2	Kira Grefkes, Manager R&D centre	Laser drying of battery anodes	Präsentation	Coatema Symposium	November 2024
3	Thomas Kolbusch; VP	New Coating Methods for PEM electrolyzer and AEM electrolyzer	Präsentation	Fuel Cell Seminar Long Beach	Januar 2025
4	Thomas Kolbusch; VP	The state of art in printed electronics. - A community, association, company and personal viewpoint	Präsentation	LOPEC 2025	Februar 2025
5	Thomas Kolbusch; VP	Laser drying of printed electronics and battery inks to reduce the dryer length and to improve the carbon footprint.	Präsentation	Techblick Boston	Juni 2025