

## Teil I - Kurzbericht

<b>Vorhabenbezeichnung:</b> KontElPro – Kontinuierliche, lösungsmittelfreie Elektrodenherstellung mit intelligenter Qualitätssicherung und Prozessüberwachung gekoppelt mit KI	
<b>Zuwendungsempfänger:</b> Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V. mit folgenden Instituten: Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie ICT Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung IFAM Fraunhofer-Institut für Werkstoff- und Strahltechnik IWS	<b>Förderkennzeichen</b> 03XP0325A
<b>Projektteam Fraunhofer ICT</b> Dr.-Ing. Philipp Heugel (Projektleiter), Dr. Markus Hagen, Dr. Franziska Klein, Josef Quan Nguyen, David Hui Shyan Lau <b>Projektteam Fraunhofer IFAM</b> Dr. Ingo Bardenhagen (Projektleiter), Lutz Kramer, Katharina Platen, Ralf Meyer <b>Projektteam Fraunhofer IWS</b> Dr. Benjamin Schumm (Projektkoordinator), Dipl.-Ing. Christian Girsule (Projektleiter), Dr. Julius Roch (Maschinenbau), Hannes Hagemann und Yvo Schöps (Versuchsdurchführung und Probenauswertung)	<b>Berichtszeitraum</b> 01.01.2021 – 31.03.2024

### Inhalt

1. Ursprüngliche Aufgabenstellung sowie wissenschaftlicher und technischer Stand..... 2
2. Ablauf des Vorhabens (ggf. Anpassungen zum ursprünglichen Arbeitsplan)..... 2
3. Wesentliche Ergebnisse sowie ggf. Zusammenarbeit mit anderen Forschungseinrichtungen ..... 2

### **1. Ursprüngliche Aufgabenstellung sowie wissenschaftlicher und technischer Stand**

Ziel von KontElPro war es, bestehende, innovative und gut skalierbare Verfahren der lösungsmittelfreien Elektrodenfertigung (Extrusion, Trockentransfer) mit einer KI-basierten Inline-Prozesskontrolle und einer standortübergreifenden, vernetzten Datenbank zu erweitern. Dafür war es notwendig, an einer Versuchsanlage für das DRYtraec®-Verfahren des Fraunhofer IWS innovative Sensorik zu integrieren. Eine automatisierte Auswertung der erfassten Daten sowie die KI-gestützte Modellierung und Optimierung der Prozesse mit digitalen Zwillingen sollten helfen, die Elektrodenfertigung an einer ausgewählten Zusammensetzung eines Pulverkomposites effizienter zu machen, die Qualität zu verbessern und den Ausschuss zu reduzieren.

Durch den Einsatz von lösungsmittelfreien Herstellungsverfahren kann auf eine zeit- und energieintensive Trocknung der Elektroden verzichtet werden. Weiterhin kann die Produktion durch die Vermeidung des Einsatzes von giftigen Lösungsmitteln wie NMP, welche insbesondere bei der Kathodenherstellung eingesetzt werden, nachhaltiger gestaltet werden. Die eingesetzten Verfahren sind unabhängig vom verwendeten Aktivmaterial und daher auch für nicht giftige, Co- oder Ni-freie Elektroden einsetzbar, womit grüne, nachhaltige Zellen hergestellt werden können und konnten. Ebenso können die Verfahren auch für Materialien für neue Zellchemien wie Na-Ionen-Zellen o.ä. verwendet werden.

### **2. Ablauf des Vorhabens (ggf. Anpassungen zum ursprünglichen Arbeitsplan)**

Das Projekt KontElPro startete am 01.01.2021 und lief ursprünglich bis zum 31.12.2023. Durch Lieferengpässe bei einzelnen Komponenten zur notwendigen Datenerfassung für den Versuchskalender des Fraunhofer IWS, unerwarteter Komplexität der Datenverarbeitungsprozesse, der Notwendigkeit zusätzlicher umfangreicher Versuche und dem erweiterten Umfang an Zelltests, kam es zu zeitlichen Verzögerungen im weiteren Projektverlauf. Daher war eine Anpassung des Zeitplans notwendig und es wurde eine kostenneutrale Laufzeitverlängerung bis zum 31.03.2024 bewilligt. Die gesamte Dauer des Vorhabens erstreckte sich somit über 39 Monate von Januar 2021 bis März 2024.

### **3. Wesentliche Ergebnisse sowie ggf. Zusammenarbeit mit anderen Forschungseinrichtungen**

Am Fraunhofer IFAM wurden Kathodengranulate rein aus den pulvrigen Rohstoffen Lithiumeisenphosphat (LFP), Ruß und PTFE-Binder ohne den Einsatz von Lösungsmitteln hergestellt. Neben der anfänglichen Nutzung von einem Knetersystem im batch-Verfahren wurde vor allem die Extrusion als Mischtechnik mit hohen Scherkräften angewendet, die in einem kontinuierlichen Fertigungsprozess zur Elektrodenherstellung eingesetzt wurde. Das hergestellte Kathodengranulat wurde zum einen an das Fraunhofer IWS zur Weiterverarbeitung im DRYtraec®-Verfahren übergeben und zum andern direkt als Edukt für die Herstellung von Kathoden verwendet. Letzteres geschah ebenfalls über ein

Extrusionsverfahren, wobei ein geschmolzenes thermoplastisches Polymer als Trägermaterial verwendet wurde.

Am Fraunhofer IWS wurden durch das DRYtraec®-Verfahren lösungsmittelfrei Elektroden hergestellt. Es wurden verschiedenartig mittels unterschiedlichem Scherkrafteintrag hergestellte Komposite in einer umfangreichen Parametermatrix zu trockenen Elektroden verarbeitet. Sämtliche Kennwerte und Charakterisierungsdaten wurden manuell erfasst und als Grundlage zur Modellierung der KI-Modelle in die Datenbank des ICT übertragen. Durch diese gewonnenen Daten war es möglich, eine vielfältige Basis an der Verknüpfung von Prozess-Analysedaten zu erhalten, Diese wurde zum Trainieren der KI-Datenbank zum Vorschlag optimaler Knet- und Extrudierparameter am IFAM und Beschichtungsparameter am IWS sowie in Vorbereitung für die kontinuierliche Prozessführung herangezogen. Zur Reduktion sonst üblicher hoher Ausschussquoten wurden die bestehenden und installierten Produktionsprozesse um weitere Prozesssensoren ergänzt. Diese stellten inline-Informationen bereit, die vormals durch nachgelagerte, diskontinuierliche Analysen gewonnen werden mussten. Dadurch kann und konnte während der Produktion korrigierend eingegriffen werden. Die dabei kontinuierlich aufgenommenen Sensor- und Prozessdaten jedes Projektpartners wurden wie die elektrochemischen Messergebnisse in einer Datenbank durch das Fraunhofer ICT gespeichert. Diese ist redundant aufgebaut, gesichert und synchronisiert. Durch Verknüpfung von Prozessparametern mit elektrochemischen Ergebnissen und durch Einsatz von KI in Verbindung mit digitalen Zwillingen durch das ZSW Stuttgart, konnten die besonders qualitätskritischen Prozessschritte und -parameter identifiziert werden und Quality Gates festgelegt werden.

Die Produktionsprozesse wurden durch Machine Learning modelliert, digitale Zwillinge der Einzelprozesse erstellt und anschließend u.a. durch Reinforcement und Lifelong Learning zuerst als Einzelprozesse und dann als Gesamtprozess für die Elektrodenherstellung mittels hierarchischer digitaler Zwillinge modelliert und optimiert.

## Teil II - Eingehende Darstellung

<b>Vorhabenbezeichnung:</b> KontElPro – Kontinuierliche, lösungsmittelfreie Elektrodenherstellung mit intelligenter Qualitätssicherung und Prozessüberwachung gekoppelt mit KI	
<b>Zuwendungsempfänger:</b> Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V.	<b>Förderkennzeichen</b> 03XP0325A
<b>Projektteam Fraunhofer</b> <b>Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie ICT (Projektleitung)</b> Angewandte Elektrochemie Dr.-Ing. Philipp Heugel Joseph-von-Fraunhofer-Straße 7, 76327 Pfinztal, Germany Tel. +49 721 4640 517 Email: <a href="mailto:philipp.heugel@ict.fraunhofer.de">philipp.heugel@ict.fraunhofer.de</a>  <b>Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung IFAM</b> Elektrische Energiespeicher Dr. Ingo Bardenhagen Wiener Straße 12, 28359 Bremen Tel. +49 421 2246-7342 Email: <a href="mailto:ingo.bardenhagen@ifam.fraunhofer.de">ingo.bardenhagen@ifam.fraunhofer.de</a>  <b>Fraunhofer-Institut für Werkstoff- und Strahltechnik IWS</b> Abteilung Chemische Oberflächen- und Batterietechnik Dipl.-Ing. Christian Girsule Winterbergstraße 28, 01277 Dresden Tel. +49 351 83391-3732 Email: <a href="mailto:christian.girsule@iws.fraunhofer.de">christian.girsule@iws.fraunhofer.de</a>	<b>Berichtszeitraum</b> 01.01.2021 – 31.03.2024

## Inhalt

Ausführliche Darstellung der im Rahmen des Vorhabens durchgeführten Arbeiten mit Vergleich zur ursprünglichen Vorhabenbeschreibung.....	3
Arbeitsplan KontElPro .....	3
Teilprojektspezifische Arbeiten des Fraunhofer IFAM .....	4
AP1 Herstellung und Charakterisierung von Elektroden/Elektrolyt .....	4
AP1.1 Trockenmischung .....	4
AP1.2 Trockentransfer.....	6
AP2 Integration / Validierung von Sensoren.....	7

AP2.1 Trockenmischung .....	7
AP2.2 Trockentransfer.....	8
Teilprojektspezifische Arbeiten des Fraunhofer IWS .....	9
AP1 Herstellung und Charakterisierung von Elektroden/Elektrolyt .....	9
AP1.2 Trockentransfer.....	9
AP2 Integration / Validierung von Sensoren.....	12
AP2.2 Trockentransfer.....	12
Teilprojektspezifische Arbeiten des Fraunhofer ICT .....	18
AP3 Datenbank .....	18
AP3.1 Auslegung, Planung, Installation der Datenbank .....	18
AP3.2 Programmieren eines SQL-Servers .....	18
AP3.3 Programmieren einer NoSQL-Datenbank .....	20
AP3.4 Programmieren eines Auswerte- und Visualisierungswerkzeugs, KPI-Berechnung.....	22
AP3.5 Prozesssteuerung – auch durch KI .....	23
AP3.6 Datenaufbereitung für die KI-Entwicklung .....	23
Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises.....	24
Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten. ....	24
Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere die Verwertbarkeit des Ergebnisses – auch konkrete Planungen für die nähere Zukunft - im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans .....	25
Während der Durchführung des Vorhabens bekannt gewordene Fortschritt auf dem Gebiet bei anderen Stellen.....	25
Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen .....	26

**Ausführliche Darstellung der im Rahmen des Vorhabens durchgeführten Arbeiten mit Vergleich zur ursprünglichen Vorhabenbeschreibung**

**Arbeitsplan KontEIPro**

Die Arbeiten erfolgten nach u.g. Arbeitsplänen.

Tabelle 1: Überblick des Arbeitsplans von KontEIPro.

		planmäßig begonnen					
		planabweichend begonnen					
		planmäßig abgeschlossen					
		planabweichend abgeschlossen					
Nr. AP	Arbeitspaket (AP)					Beginn	Ende
<b>Berichtszeitraum 01.01.2021 – 31.03.2024</b>							
<b>AP1 Herstellung u. Charakterisierung von Elektroden/Elektrolyt</b>							
1.1	Trockenmischung	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	01/2021	06/2023
1.2	Trockentransfer	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	01/2021	03/2024
<b>AP2 Integration/Validierung von Sensoren</b>							
2.1	Trockenmischung	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	01/2021	06/2023
2.2	Trockentransfer	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	01/2021	03/2024
<b>AP3 Datenbank (ICT)</b>							
3.1	Auslegung, Planung, Installation der Datenbank	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	01/2021	Plan: 06/2022
3.2	Programmieren eines SQL Servers	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	01/2021	01/2024
3.3	Programmieren einer NoSQL Datenbank	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	01/2021	01/2024
3.4	Programmieren eines Auswerte- und Visualisierungswerkzeugs, KPI-Berechnung	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	01/2022	01/2024
3.5	Prozesssteuerung – auch durch KI	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	01/2023	03/2024
3.6	Datenaufbereitung für die KI-Entwicklung	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	09/2021	03/2022

Tabelle 2: Überblick des Arbeitsplans von KontEIPro. Die Arbeiten im Jahr 2024 entsprechen denen während der kostenneutralen Laufzeitverlängerung.

	2021				2022				2023				2024	
	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	
AP 1: Herstellung u. Charakterisierung von Elektroden/Elektrolyt (IFAM)														
UAP 1.1: Trockenmischung														
UAP 1.2: Trockentransfer														
AP 2: Integration/Validierung von Sensoren (WS)														
UAP 2.1: Trockenmischung														
UAP 2.2: Trockentransfer														
AP 3: Datenbank (ICT)														
UAP 3.1: Auslegung, Planung, Installation der Datenbank														
UAP 3.2: Programmieren eines SQL Servers														
UAP 3.3: Programmieren einer NoSQL Datenbank														
UAP 3.4: Programmieren eines Auswerte- und Visualisierungswerkzeugs, KPI Berechnung														
UAP 3.5: Prozesssteuerung – auch durch KI														
UAP 3.6: Datenaufbereitung für die KI Entwicklung														

## Teilprojektspezifische Arbeiten des Fraunhofer IFAM

### AP1 Herstellung und Charakterisierung von Elektroden/Elektrolyt

#### AP1.1 Trockenmischung

Am Fraunhofer IFAM wurden zunächst Trockenmischungen mittels diskontinuierlichem Messknetzer durchgeführt. Dabei ging es zum einen um die Evaluation der Trockenmischung insgesamt und zum anderen um die Erfassung der entscheidenden Einflussfaktoren. Zunächst wurden dafür Materialparameter festgelegt, die im Projekt konstant gehalten wurden, um vergleichbare Messungen zu erhalten. Es wurde entschieden mit  $\text{LiFePO}_4$  (LFP) als Aktivmaterial, Super C65 als Leitadditiv und PTFE als polymerem Binder zu arbeiten, um die Kathodengranulate herzustellen. Die festgelegten Massenverhältnisse waren LFP / Super C65 / PTFE = 90 / 8 / 2. Die Verarbeitung der Materialien erfolgte in einem Messknetzer mit Sigma-Schaukeln, wobei Temperatur und Drehzahl des Prozesses variiert wurden. In Abbildung 1 sind die aufgezeichneten Drehmomente für Messungen bei Raumtemperatur (25 °C) und 150 °C dargestellt. Es zeigt sich eine starke Abhängigkeit des Drehmoments von beiden Parametern. Bei Raumtemperaturmessungen wird eine lange Zeit benötigt, bevor der Mischprozess startet, während dies bei 150 °C nahezu direkt nach Beginn der Messung der Fall ist. Im letzteren Fall ist ebenfalls deutlich zu erkennen, dass die aufgezeichneten Werte mit steigender Drehzahl weniger verrauscht sind und zu einem stärkeren, aber kürzeren Anstieg des Drehmoments führen.

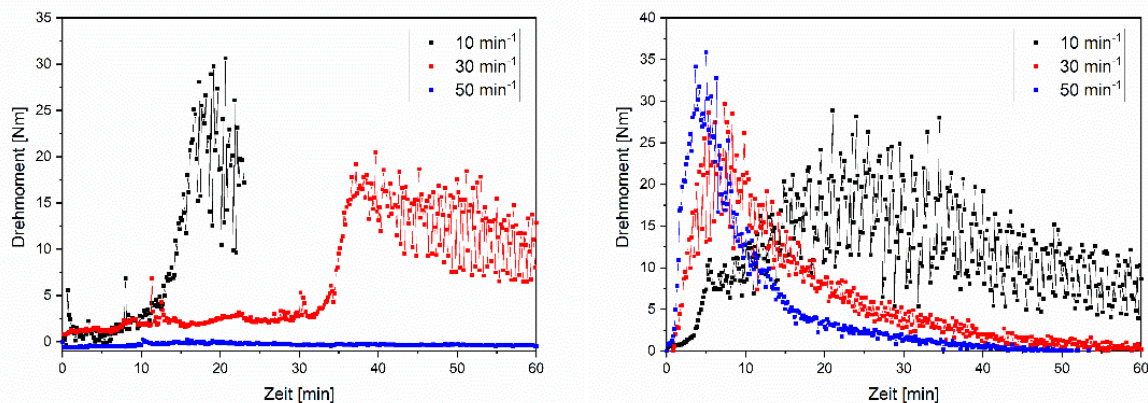


Abbildung 1: Aufnahme des Drehmoments in Abhängigkeit von der Drehzahl und Temperatur während der Mischung, links 25 °C und rechts 150 °C.

Die unterschiedlichen Mischungen haben alle eine optisch zusammenhängende Masse (Kathodengranulat) ergeben, die die grundsätzliche Eignung der Methode belegt. Ein Unterschied lässt sich erst in der morphologischen Untersuchung mittels REM feststellen, wie in Abbildung 2 dargestellt. Die bei Raumtemperatur gemischten Proben weisen noch immer eine örtliche Trennung von Super C65 (dunkle Bereiche) und LFP auf (helle Partikel), allerdings keine „Kohlenstoffnester“. Bei den Mischungen bei 150 °C sind dagegen einzelne PTFE Fasern sichtbar und der Kohlenstoff beschichtet die LFP Partikel.

Im nächsten Schritt wurden Versuche am Einschneckenextruder mit zwei unterschiedlichen Schneckengeometrien evaluiert: Eine reine Förderschnecke, die nur geringe Scherung in das Material einbringt und eine Kompressionsschnecke, die starke Scherung zwischen dem Schneckenkern und der Extruderwand erzeugt. Bei dem Versuch die Förderschnecke inklusive einer Düse zu verwenden, sammelte sich das Extrudat vor der Düse an und sorgte für einen sprunghaften Anstieg des Druckes

und des Drehmomentes. Entsprechend wurde in den weiteren Versuchen mit offener Schnecke ohne Düse gearbeitet. Hierbei konnte allerdings weder ein relevantes Drehmoment aufgezeichnet noch eine Veränderung des Materials beobachtet werden. Ein Wechsel zur Kompressionsschnecke sorgte dagegen für einen sehr raschen Anstieg des Drehmomentes noch bevor das Material den Ausgang des Extruders erreicht hat. Die Scherung zwischen dem Schneckenkern und dem Extrudat sind bei der Trockenmischung zu hoch.

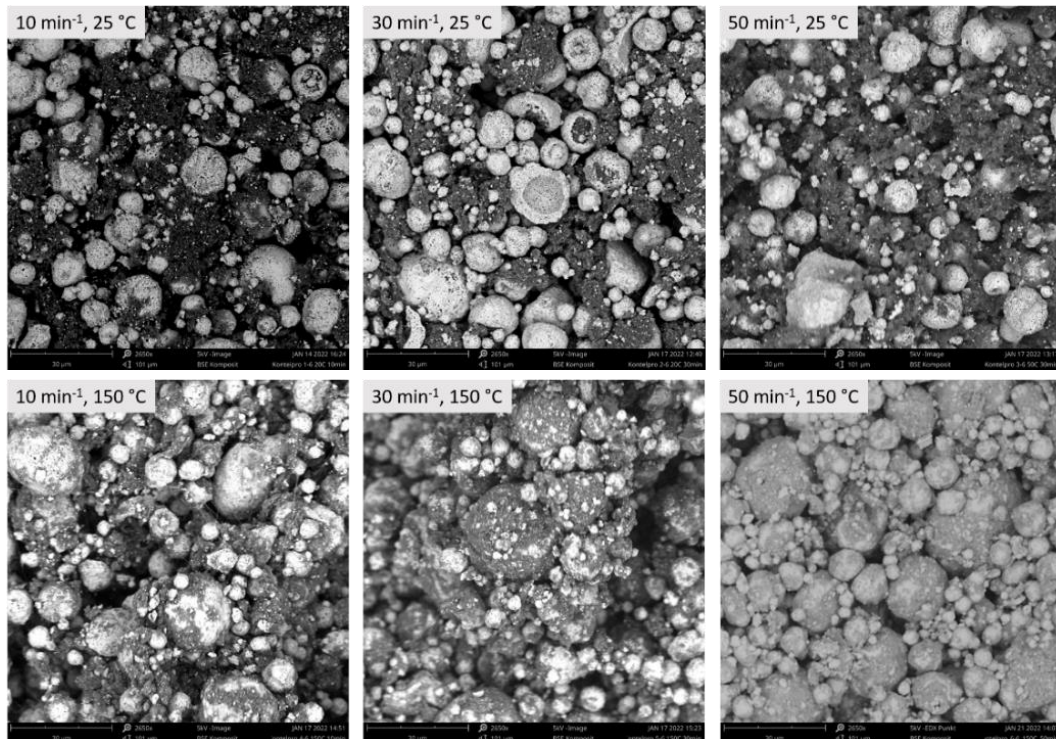


Abbildung 2: REM Aufnahmen von den Kathodengranulaten in Abhängigkeit von der Temperatur und der Drehzahl.

Insgesamt zeigte sich, dass das entstehende Extrudat stark drucksensitiv ist und sich nur schlecht in Form bringen lässt, wie es klassischerweise am Ende eines Extrusionsprozesses passiert. Die zweite Erkenntnis aus den Versuchen war, dass das Drehmoment sehr sensibel eingestellt werden musste, um ein gutes Mischergebnis zu erhalten. Diese Einstellbarkeit ist am IFAM vor allem durch die Extrusion mittels Doppelschneckenextruder realisierbar.

Entsprechend wurden die weiteren Versuche direkt mit dem Mini-Compounder KETSE 12/36 der Fa. Brabender durchgeführt. Er verfügt über einen Schneckendurchmesser von 12 mm. Die Schnecke ist modular aufgebaut und lässt sich in unterschiedlichen Bereichen des Extruders mit Förder-, Knet oder Mischelementen ausstatten. Die ersten Experimente wurden mit der „Standardschnecke“ durchgeführt, die neben Förderelementen zwei Knetzonen enthält. Alle Versuche wurden analog zu den Untersuchungen im diskontinuierlichen Knetter bei einer Temperatur von 150 °C durchgeführt.

Es zeigte sich, dass das Kathodengranulat in den Knetzonen entsteht und entsprechend nach den Zonen nicht mehr an den Förderschnecken haften bleibt. Im Vergleich zu den im diskontinuierlichen Prozess hergestellten Granulaten wies die Mischung noch eine starke Trennung zwischen den drei festen Komponenten auf. Beim Prozess werden vor allem der Kohlenstoff und der PTFE-Binder verbunden, dass sich als Moss-artige Bereiche in den REM Aufnahmen erkennen lässt. Die gewünschte Anbindung bzw. das Coating der LFP Partikel (helle Partikel) ist nur sehr schwach. Zusätzlich zeigte sich, dass bei höheren Drehzahlen mehr PTFE in großen Strängen verbleibt, also nur ein partielles Entfasern stattfindet.

Die Qualität des Kathodengranulats scheint entsprechend maßgeblich von der Dauer und der Intensität der Scherung abzuhängen. Um eine höhere Scherung in das System einzubringen, wurde eine virtuelle Erhöhung der Knetelemente durchgeführt, indem das Material mehrfach mit dem Extruder verarbeitet wurde. Um dies möglich zu machen, mussten die Extrudate nach dem Durchlauf zunächst mittels manueller Schermühle deagglomert werden, da ansonsten keine erneute Zuführung möglich war. Es zeigte sich eine leichte Verbesserung der Qualität des Kathodengranulats pro Durchlauf, was die Annahme zur Scherung bestätigte.

Um diesen Effekt auch in einem Durchlauf darzustellen, wurden weitere Knetelemente getestet, neutrale und Stau-Knetelemente, die das Extrudat nicht fördern. Dadurch verblieb es länger in den Knetzonen. In Abbildung 3 sind sowohl Fotos von der Doppelschnecke nach dem Versuch als auch die Drehmomentkurve während des Versuches mit dem neutralen Knetelement dargestellt. Es ist zu erkennen, dass sich das Material an und vor dem neutralen Knetelement ansammelt und dabei die Schnecke festsetzt. Erkennbar ist dies auch in dem schlagartigen Anstieg des Drehmoments (Abbildung 3.b). Der starke Energieeintrag am neutralen Knetelement sorgt zusätzlich für eine Verfärbung des Kathodengranulats, was auf eine etwaige Zerstörung des Komposites hindeuten kann.

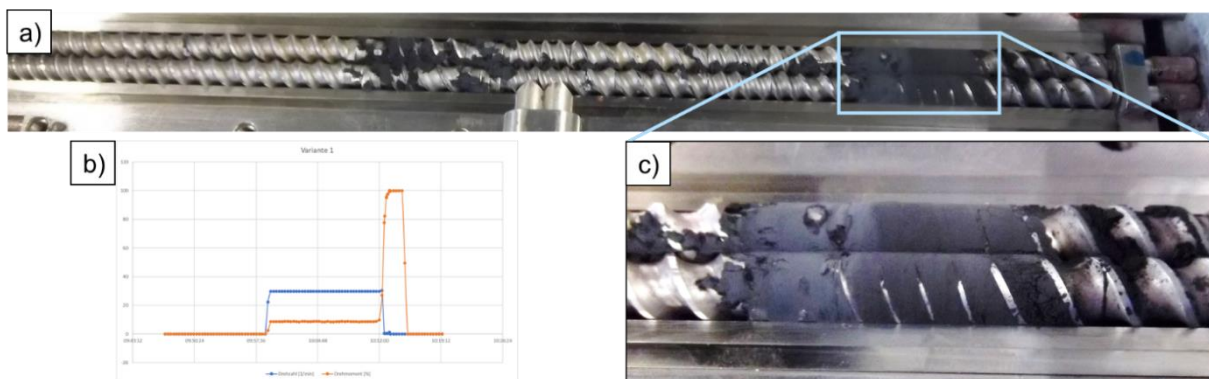


Abbildung 3: Doppelschneckenextruder mit neutralem Knetelement vor den zwei Förder-Knetelementen; a) Foto von der Doppelschnecke nach Abbruch des Versuches; b) Drehmomentkurve des Versuches, wobei die Drehzahl in blau und das Drehmoment in orange dargestellt ist; c) Vergrößerung des Fotos am neutralen Knetelement.

## AP1.2 Trockentransfer

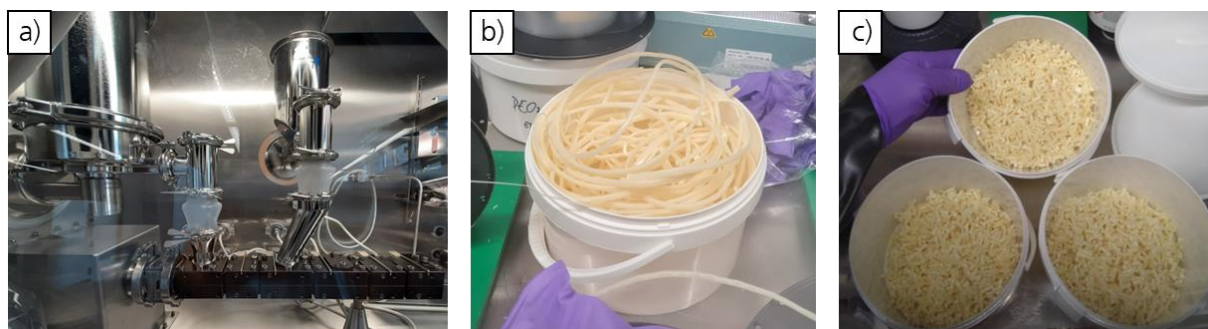


Abbildung 4: a) Foto von dem Extruder in der Glovebox. Sichtbar sind die zwei Zuführungen zu der Doppelschnecke; b) Extrudierter Strang vom Polymerelektrolyten; c) Granulierter Polymerelektrolyt.

Für die Arbeiten an Festkörperelektrolyten wurde zunächst der reine Elektrolyt an dem Extruder in der Glovebox verarbeitet. Gemischt wurden dafür Polyethylenoxid (PEO) mit dem Leitsalz LiTFSI ohne den Zusatz von Lösungsmitteln. Dafür wurde das PEO bei 90 °C aufgeschmolzen und dann das Leitsalz eingeknetet. Das Extrudat wurde mit einer Düse zu einem Strang geformt, der nachträglich granuliert wurde (Abbildung 4). Das Polymergranulat wurde anschließend zusammen mit dem Kathodengranulat aus dem Trockenmischprozess erneut in dem Extruder verarbeitet. Durch die Verarbeitung mittels

Schlitzdüsenwerkzeug lässt sich aus der Mischung eine freistehende Kompositkathode herstellen (Abbildung 5.a). Durch die Variation der Schneckengeschwindigkeit lässt sich hierbei auch die Produktionsgeschwindigkeit einstellen und somit auch der Meilenstein von 3 kg/h bereits bei einer Drehzahl von 20 rpm erreichen (Abbildung 5.b).

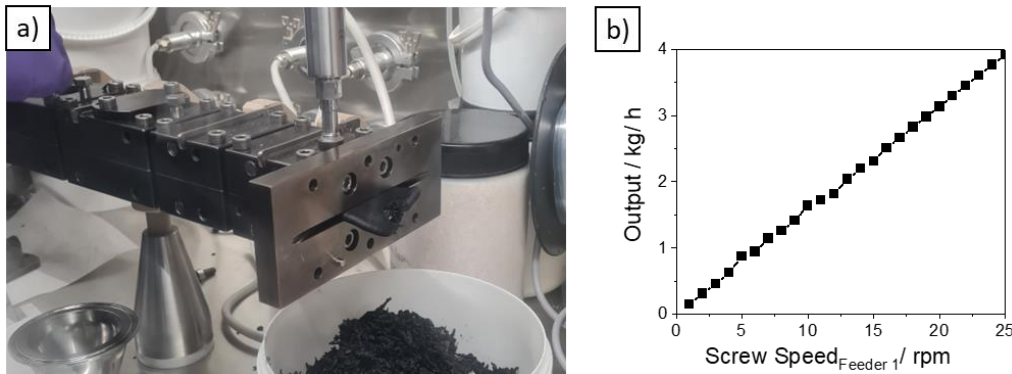


Abbildung 5: a) Foto von der Schlitzdüsenwerk mit der extrudierten Kathodenschicht; b) Kennlinie zum Materialoutput des Extruders in Abhängigkeit der Schneckengeschwindigkeit.

Die hergestellten Kathoden wurden anschließend in Halbzellen getestet und in Abhängigkeit zu der Produktionsgeschwindigkeit evaluiert. Ein klassischer Ratentest von Kathoden, die sehr langsam (5 rpm) und sehr schnell (60 rpm) produziert wurden, ist in Abbildung 6.b dargestellt. Es zeigt sich, dass die höhere Drehzahl durch den stärkeren Energieeintrag für eine bessere Homogenität der Probe sorgt und dadurch bessere Kapazitäten bei höheren Raten (0,2C & 0,5C) erhalten werden. Die Verteilung des Kathodengranulates wurde zusätzlich mittels Rasterelektronenmikroskopie untersucht. Abbildung 6.a zeigt den Querschnitt der 60 rpm Kathode nach einem nachträglichen Verdichtungsschritt. Es zeigt sich eine gleichmäßige Schicht bestehend aus Polymerelektrolyt und Kathodengranulat.

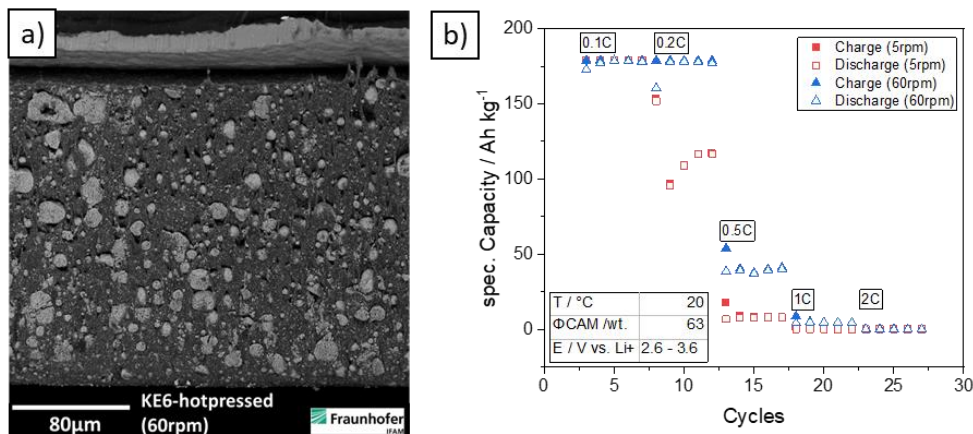


Abbildung 6: a) REM Querschnitt von der bei 60 rpm extrudierten Kathode; b) Ratentest der hergestellten Kathoden gegen metallisches Lithium.

## AP2 Integration / Validierung von Sensoren

### AP2.1 Trockenmischung

Ziel des AP2.1 war im ersten Schritt die Qualifizierung der Kathodengranulate aus AP1.1 zur Bestimmung von „Gut-“ und „Schlecht-“ Proben. Diese Identifikation war für die später mittels KI erfolgende Steuerung des Prozesses unerlässlich. Die Identifikation von „Gut-“ Proben war dabei für das erstellte Halbzeug Kathodengranulat noch nicht etabliert. Die Bewertung von REM-Aufnahmen war ein Schlüssel zur Bewertung des Kathodengranulats. Im Abgleich mit dem Verhalten im Trockentransfer hat sich gezeigt, dass die Verarbeitbarkeit besser wurde, je stärker die drei festen

Komponenten miteinander gemischt wurden. Dies zeigte sich vor allem in der Beschichtung des Kohlenstoffmaterials an den LFP Partikeln.

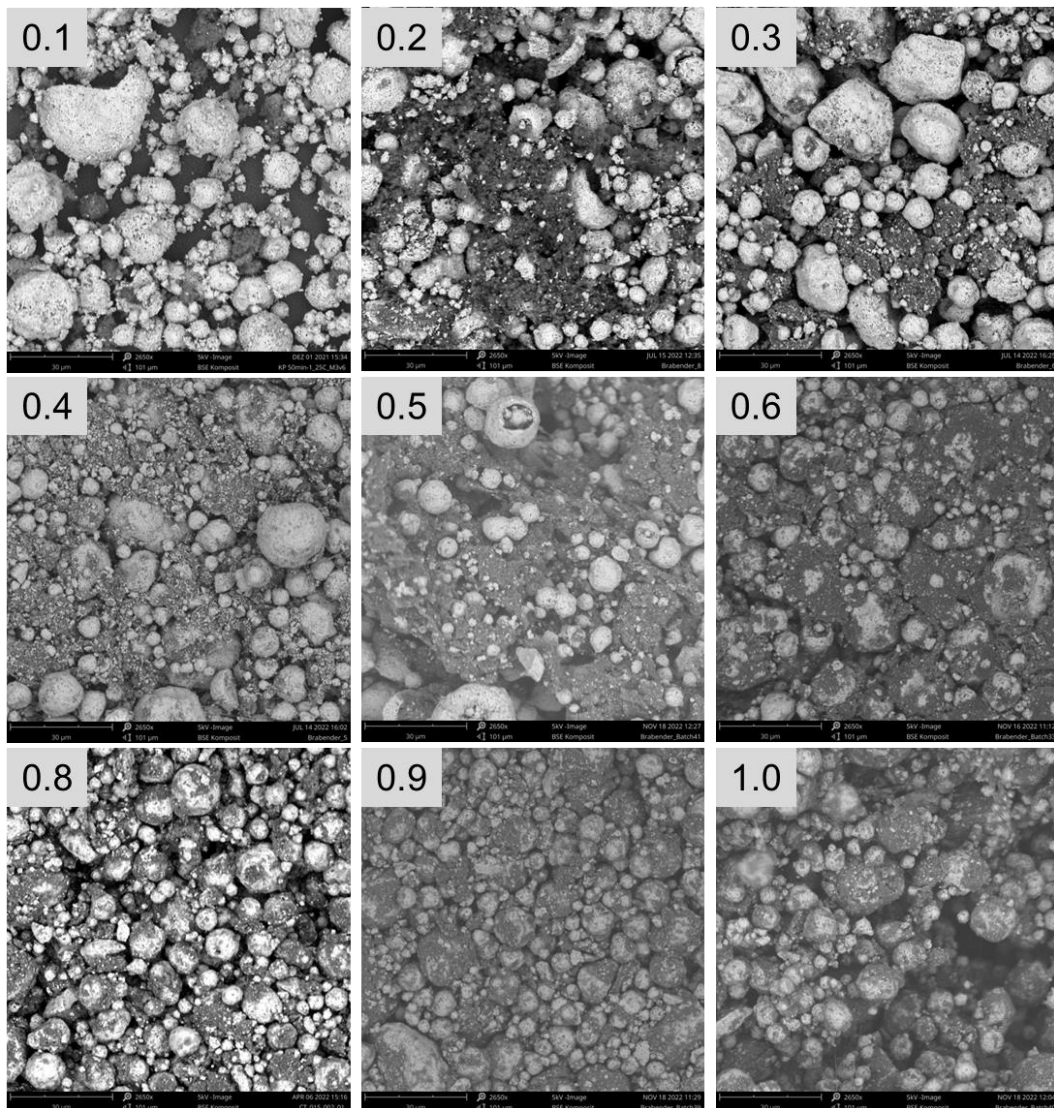


Abbildung 7: REM Aufnahmen von Kathodengranulaten mit unterschiedlicher Qualität von 0,1 bis 1,0.

Zur Bewertung wurden die REM-Aufnahmen (Abbildung 7) optisch ausgewertet und mit einer dimensionslosen Qualitätszahl zwischen 0 und 1 bewertet. Parallel wurde diese Bewertungsskala mittels Machine Learning Ansätzen vom ZSW simuliert und in einen sogenannten virtuellen Sensor übertragen. Ziel war es, anhand von REM Trainingsdaten den Prozess bzw. die Prozessparameter kontrollierbar zu machen, so dass final keine REM Untersuchungen mehr durchgeführt werden müssen.

## AP2.2 Trockentransfer

In AP2.2 wurde am IFAM die Sensorintegration an dem Glovebox-Extruder etabliert und überprüft. Eingebaut wurde hier ein Drucksensor an der Düse, also dem formgebenden Werkzeug am Ende der Doppelschnecke. Hiermit lässt sich die Produktion der hergestellten Polymerelektrolyten bzw. der fertigen Kathodenschichten überwachen. Die Werte können dabei wie geplant mit einer sekundengenau erfasst werden. In Abbildung 8 sind typische Werte einer Extrusion beispielhaft dargestellt. Bei der Datenerfassung über Zeit (Abbildung 8.a) ist neben der Erhöhung des Drehmoments zu Beginn der Extrusion sichtbar, dass sich über Zeit ein konstanter Wert bei

Drehmoment und Druck ausbildet. Dieser ist besonders bei niedrigen Drehzahlen unter 15 rpm noch deutlich geringer. Bei höheren Drehzahlen sind Druck und Drehmoment einigermaßen konstant, was für einen gleichmäßigen Energieeintrag spricht und somit eine gute Homogenität gewährleistet.

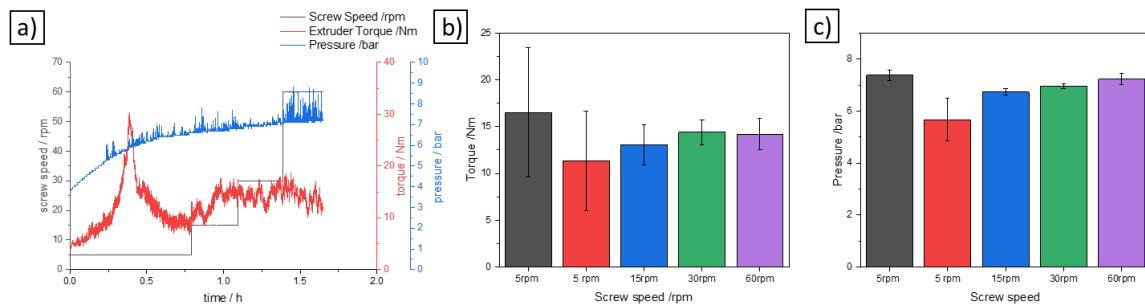


Abbildung 8: a) Messdaten der Extrusion des Polymerelektrolyten in Abhängigkeit von der Drehzahl des Extruders (schwarz). Der Druck an der Düse (blau) als auch das Drehmoment (rot) können dauerhaft überwacht werden; b) Mittlere Drehmomente in Abhängigkeit der Drehzahl des Extruders; c) Mittlerer Druck in Abhängigkeit der Drehzahl des Extruders.

## Teilprojektspezifische Arbeiten des Fraunhofer IWS

### AP1 Herstellung und Charakterisierung von Elektroden/Elektrolyt

#### AP1.2 Trockentransfer

Inhalt des AP 1.2 seitens des Fraunhofer IWS war, Beschichtungsexperimente zur Erarbeitung von Trainingsdatensätzen zur Entwicklung eines KI-Modells mit dem Trockentransferverfahren DRYtraec® des IWS durchzuführen und Charakterisierungen an den erzeugten Schichten zu machen.

Bei der eingesetzten Beschichtungstechnik DRYtraec® wird ein trockenes Gemisch in den Spalt zweier gegenläufig rotierender Walzen eingebracht (Abbildung 9). Bedingt durch die Scherkräfte im Spalt wird so im Zusammenspiel mit dem verwendeten PTFE-Binder, eine trockene Schicht auf der schneller rotierenden Kalenderwalze erzeugt. Durch nachgelagerten Übertrag auf geprimerte Stromableiterfolie kann eine Elektrodenbeschichtung erzeugt werden. Dieser Prozess ist am IWS etabliert und wird in KontElPro nicht weiterentwickelt. Hingegen soll eine bessere Prozessüberwachung und Steuerung durch Integration von Sensorik möglich werden.

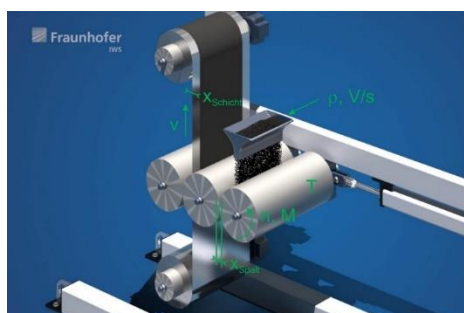


Abbildung 9: Schematische Darstellung des Trockentransferverfahrens DRYtraec® des IWS und der zu erfassenden Messgrößen

Mit den vom IFAM hergestellten Gemischen sind iterativ am IWS Beschichtungsexperimente nach vorherigem Deagglomerieren der Trockengemischflakes durchgeführt worden (Abbildung 10). Die Beschichtungsexperimente sind in Bezug auf folgende Aspekte hin bewertet worden: Ausbilden der Beschichtung (subjektiv in gut/mittel/schlecht), Beladung, Dicke, Dichte, Adhäsion und Leitfähigkeit.



Abbildung 10: Beispiele von am IWS erzeugten Beschichtungen. Die Proben haben alle die gleiche Größe (Beschichtungsbereich ca. 8 cm x 16 cm). Links: Beispiel einer guten Beschichtung mit zur Skalierung geeigneten Eigenschaften. Rechts: Beispiele für die Klassifizierung in gut/mittel/schlecht von Beschichtungsergebnissen nach dem resultierenden Beschichtungsbild.

Neben Trockengemischen, die durch eine Variation von Parametern im Knetzer des IFAM hergestellt wurden, konnten auch Trockengemische mit Hilfe des kontinuierlichen Extrusionsprozesses zu Schichten am IWS-Kalender verarbeitet werden.

Tabelle 3: Parametermatrix zur Durchführung des Trockentransferprozesses an unterschiedlichen Knetzer- und Extruder Batches des Fraunhofer IFAM

Versuchsnummer	$V_{\text{Trägerwalze}}$ [mm/s]	$V_{\text{Gegenwalze}}$ [mm/s]	Temperatur [°C]	Spalt [ $\mu\text{m}$ ]	Kraft [kN]
1	70,0	25,0	110,0	50,0	10,0
2	60,0	18,0	110,0	50,0	10,0
3	40,0	12,0	110,0	50,0	10,0
4	20,0	6,0	110,0	50,0	10,0
5	50,0	20,0	120,0	30,0	10,0
6	70,0	14,0	120,0	30,0	10,0
7	50,0	14,0	120,0	30,0	6,0
8	58,0	18,9	120,0	30,0	7,4
9	50,0	14,0	120,0	30,0	6,0
10	50,0	14,0	120,0	46,8	6,0
11	58,4	14,0	120,0	30,0	6,0
12	41,6	14,0	120,0	30,0	6,0
13	50,0	14,0	120,0	13,2	6,0

Die Parametermatrix wurde für im Knetzer optimierte prozessierte Materialien mithilfe von DoE-Methoden erweitert. Für die Bewertung von bewusst fehlerhaft hergestellten Knetzerbatches (Unterfüllung und deutlich geringere Knettemperatur) und der 1-fach, 2-fach und 3-fach extrudierten trockenen Gemische (Batch 28 – 30, 41 und 42) wurde eine hinreichend vielfältige Versuchsparmetermatrix bestehend aus 13 Einzelversuchen herangezogen, bei denen die wichtigsten Prozessparameter (Rotationsgeschwindigkeit der Walzen, Spaltweite, Temperatur, Presskraft) variiert wurden. Eine Parametermatrix für Trockentransferprozesse ist Tabelle 3 zu entnehmen.

Es konnte eine umfangreiche Datengrundlage, bestehend aus ca. 200 Einzeldatensätzen, für die Entwicklung der Datenbank und der KI zur Verfügung gestellt werden. Neben den Prozessdaten und Analysedaten zur Schichtdicke, Beladung und Dichte beinhaltete diese Datensammlung auch Daten zur Partikelgrößenverteilung des gemahlten Pulvergemisches sowie dem spez. Widerstand, der Schichtadhäsion und einem subjektiven Bewertungsparameter, der „Coatability“.

Bevor die Datenbank zur Nutzung zur Verfügung stand, wurde die Excel-Tabelle mit den gesammelten gelisteten und stetigen wachsenden Umfängen an Daten in regelmäßigen Abständen den Projektpartnern für Folgeaktivitäten zur weiterführenden Nutzung überlassen. Im weiteren Projektverlauf wurde die Excel-Liste durch die entwickelte Datenbank des ICT abgelöst.

## Knopfzelltests

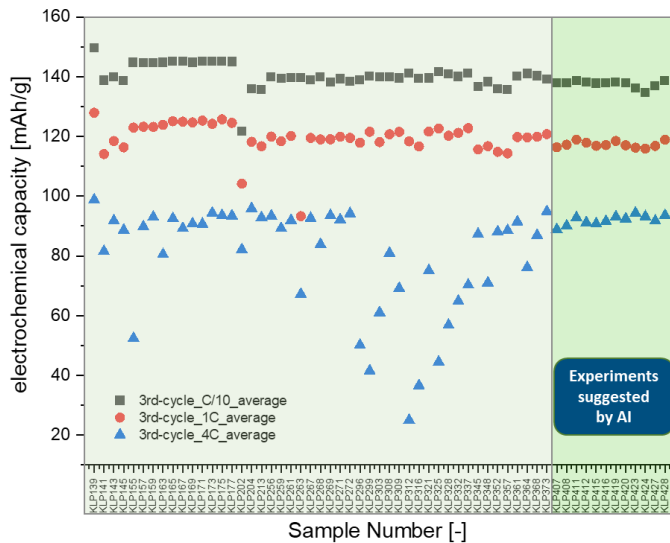


Abbildung 11: elektrochemische Speicherkapazität von Knopfzellen aus dem Projekt KontEIPro

Über die gesamte Projektlaufzeit wurden ausgewählte Proben mit einer hinreichenden „Coatability“ zur Erlangung einer erweiterten Datenbasis für den Zellbau in Knopfzellen herangezogen. Eine Knopfzelle definiert sich dabei über 3 Kennwerte, der Kapazität nach dem jeweiligen 3. Zyklus nach einer Entladerate von C10, 1C und 4C. Die Zelldaten wurden mindestens im Rahmen einer Doppelbestimmung erfasst. Besonders über die 4C-Kapazität definiert sich die Qualität einer elektrochemischen Zelle und es lassen sich Unterschiede erkennbar machen. Im letzten Drittel des Projektes wurden Versuchssettings, auf Basis der vorangegangenen Daten, von dem seitens des ZSW entwickelten KI-Modells vorgeschlagen. Wesentliche Merkmale dieser Versuche waren ein verringerter Spalt und eine geringere Kraft als herkömmlich. Alle diese Zellen weisen eine gleichmäßige 4C-Kapazität von ca. 90 mAh/g auf (Abbildung 11).

## Versuche Recycling

Weiterhin wurden mit dem Knetter-Batch 15 des IFAM systematische Versuche mit Beimischung von recyceltem Material – d.h. bereits einmal und zweimal am Kalandar prozessiert – durchgeführt (Abbildung 12).

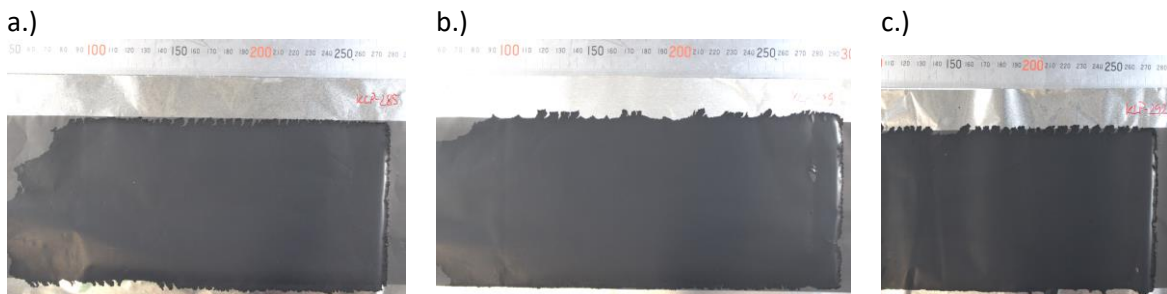


Abbildung 12: Aus Knetter-Batch 15 trocken hergestellte Elektrodenschichten;

a.) aus aufgemahlenem Material Batch 15-A;

b.) 5% des verarbeiteten Batch 15-A (Batch 15-B) zu 95% Ausgangsmaterial beigemischt --> Batch 15-C;

c.) 5% des bereits doppelt verarbeiteten Materials aus Batch 15-C (Batch 15-D) zu 95% Ausgangsmaterial beigemischt --> Batch 15-E

Bei einer 5%-igen Beimengung von vorab bereits verarbeitetem Material (wieder aufgemahlen) war es möglich, Elektroden mit dem Trockentransferverfahren herzustellen.

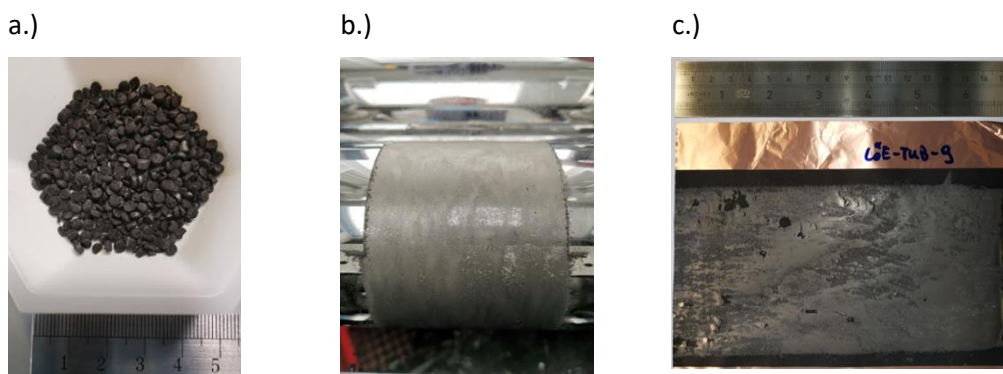
In der Beladung (ca. 12 mg/cm<sup>2</sup>) und Dichte (ca. 1,25 – 1,3 g/cm<sup>3</sup>) konnte keine signifikante Änderung in Abhängigkeit der Recyclingdurchläufe festgestellt werden.

Hier zeichnete sich ein klarer Vorteil des DRYtraec®-Prozesses ab, da sich der Recyclingaufwand durch verfahrenstechnisch etablierte Methoden wie Rollmesser, Rakel und einer Absaugvorrichtung in Grenzen hält. Nicht laminiertes Material wird gesammelt und kann dem Feedstock definiert wieder beigemischt werden. Der Verschnitt des kostenintensiven Ausgangsmaterials kann so auf ein Minimum reduziert werden.

### **Versuche mit GranuProd-Material**

Im Rahmen der Aktivitäten im Clusternetzwerk wurde extrudiertes Anodenmaterial mit einem geringen Anteil an Lösungsmittel, bestehend aus Graphit, Super C65 Ruß, CMC und Kautschuk der TU Braunschweig im DRYtraec-Prozess verarbeitet. Die Prozessparameter wurden auf Basis von Erfahrungen ausgewählt.

Das Ausgangsmaterial, in Form von extrudierten Pellets, konnte nicht vom Kalanderspalt direkt eingezogen werden. Es war ein Aufmahlen der Pellets erforderlich.



*Abbildung 13: Versuchsstadien mit Anodenmaterial aus Projekt „GranuProd“;*

*a.) Ausgangsmaterial, Pellets mit ca. 3 mm Durchmesser;*

*b.) aus gemahlenem Material applizierte Schicht auf Walzenoberfläche*

*c.) hergestellte Trockenelektrode nach Parameteranpassung, die Schicht weist Inhomogenitäten und Lücken auf*

Es hat sich gezeigt, dass DRYCoating grundsätzlich auch mit dieser Art von Material möglich ist. Jedoch war auch nach Parameteranpassung keine Ausbildung einer zusammenhängenden, optisch dichte Schicht möglich. Zusätzlich wurde ein unzureichender Übertrag aufgrund zu starker Adhäsion zur Walzenoberfläche des auf der Walze haftenden Materials festgestellt (Abbildung 13). Die Ergebnisse wurden mit der TU Braunschweig geteilt und diskutiert.

## **AP2 Integration / Validierung von Sensoren**

### **AP2.2 Trockentransfer**

Beim Trockentransferprozess des IWS sollten verschiedene Messgrößen sensorisch erfasst und anschließend validiert werden. Zudem sollten eine Sensorkomponente zur Bewertung der resultierenden Schichtdicke und Schichthomogenität etabliert werden, welche eine Echtzeit-Bewertung der Beschichtungsqualität ermöglichen sollte. Die gesammelten Prozessdaten wurden in die KontElPro Datenverarbeitung (AP 3 und AP 4) eingespeist. Des Weiteren wurde der Zugriff der KI-

Steuerung realisiert, sodass eine Prozessregelung und -Aufzeichnung automatisiert (AP 4) ermöglicht wurde.

Für eine möglichst komplette Erfassung des Herstellungsprozesses sollten relevante Parameter erfasst werden und zeitaufgelöst gespeichert werden.

Die wichtigsten Messgrößen sind hierbei:

- Walzenspalt
- Walzenspaltdruck
- Drehmoment und Drehzahl der Walzen
- Schichtdicke

### **Kapazitive Spaltmessung**

Die kapazitive Abstandmessung beruht auf der physikalisch bedingten Änderung der Kapazität eines Kondensators bei Veränderung seines Dielektrikums. Da der Messkopf deutlich höher verbaut ist als der Walzenspalt, wurden zwei Sensoren im definierten Winkel oberhalb des Walzenspalt positioniert. Durch das Vermessen der Abstände zu den Walzen, sowie dem definierten Winkel konnte über Triangulation der Walzenspalt bestimmt werden (Abbildung 14).



Abbildung 14: Schematische Darstellung des Aufbaus zur kapazitiven Spaltmessung (links) und Foto der beschafften kapazitiven Sensoren vor dem Einbau

Die automatische Spaltverstellung und kapazitiven Sensoren konnten erfolgreich am IWS Kalender eingebaut werden.

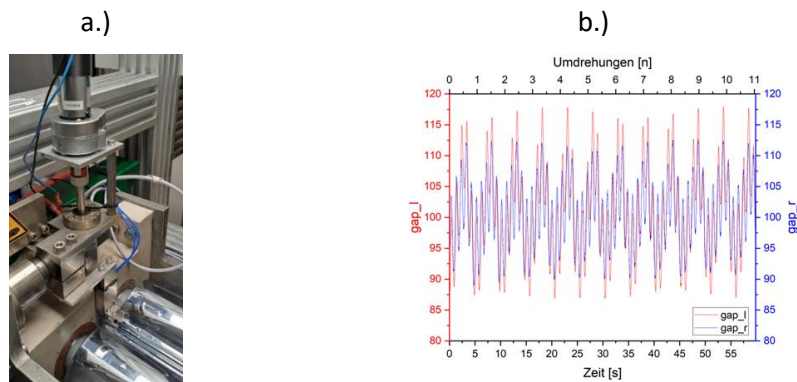


Abbildung 15: a.) Foto der automatischen Spaltverstellung und der eingebauten kapazitiven Sensoren zur Spaltmessung und b.) Validierungsversuch zur Funktionsüberprüfung der Spaltmessung

Mithilfe von Validierungsversuchen im kraftlosen Zustand des Kalenders konnte die Funktion der Sensoren überprüft werden. Abbildung 15 zeigt beispielsweise die Rundlauf toleranzen, die hauptsächlich durch die Wälzlager des Walzenpaares erzeugt werden. Es konnte eine hohe Messgenauigkeit sowie Reproduzierbarkeit nachgewiesen werden. Im unbelasteten Zustand wurden

so Abweichungen des eingestellten Spaltes bei sich drehenden Walzen von +- 15 µm auf der linken und +- 10 µm auf der rechten Seite festgestellt. Diese Rundlauf toleranzen werden geringer mit zunehmender Last der Lager. Durch Versuche im Prozessbetrieb wurde dies entsprechend nachgewiesen (vgl. Abbildung 20).

### **Messung von Drehmoment/Drehzahl**

Ein für den Herstellungsprozess wichtiges Verfahren ist das Auswalzen des Elektrodenkomposits, bei dem es zu einer Scherung des Materials kommt. Die Scherung, hervorgerufen durch eine Drehzahldifferenz beider Walzen, führt zu einer Fibrillierung und somit Vernetzung des PTFE-Binders, was eine Einbettung und mechanischen Stabilisierung von Aktivmaterial und Ruß im Elektrodenmaterial bewirkt. Die bestehende Anlagentechnik ermöglichte bisher lediglich die Vorgabe einer Drehzahl. Eine Rückmeldung, ob diese Drehzahl gehalten werden konnte bzw. ob und wie sich diese im Prozess ändert, erfolgte nicht. Auch konnte nicht bestimmt werden, welche Leistung eingebracht wird, da kein Drehmoment erfasst wird. Durch den eingebauten Drehmomentsensor können hierzu nun Messwerte aufgenommen werden (Abbildung 16). Damit ging jedoch auch die Installation deutlich leistungsstärkerer Antriebe mit größerem Bauraum einher, was intensive Umbauten am Gerät nach sich gezogen hat. Die neuen Antriebsmotoren verfügen zudem über einen eigenen Drehzahlsensor, der die aktuelle Drehzahl der Frequenzumrichter übermittelt. Über einen PID-Regler im closed-loop Verfahren erfolgt nun eine Drehzahlstabilisierung.

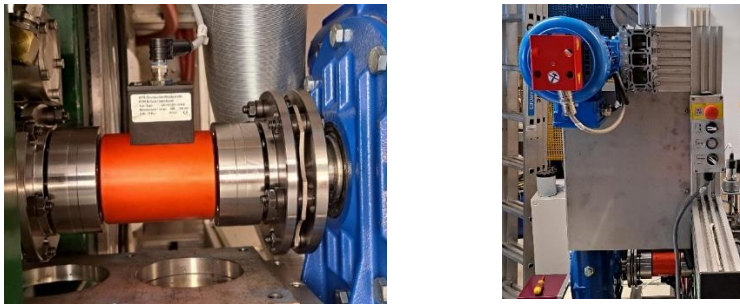


Abbildung 16: a.) Foto des eingebauten Drehmomentsensors am Kalandr und b.) Antriebsstrang, bestehend aus Getriebemotor, Schneckengetriebe und Drehmomentsensor

### **Kraftmessung**

Die bestehenden Kraftsensoren mit Messbereich 0 ... 5000 N wurden gegen typenähnliche Kraftsensoren mit einem Messbereich von 0 ... 10.000 N erweitert. Das Messsignal wird analog an die speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) übertragen.

### **Integration in Anlagentechnik-Mechanischer Umbau**

Die Implementierung der Sensorik erforderte einen erheblichen Umbau der Anlage. Neben größeren Antrieben und der Drehmomentsensoren musste auch die Bandführung geändert werden, um die Schichtdickenmessung zu realisieren. Die Konzeptionierung des neuartigen Anlagensystems war bereits in 2021 abgeschlossen (Abbildung 17). In 2022 wurde erfolgreich die Detailkonstruktion und die Fertigung notwendiger Bauteile fertiggestellt.

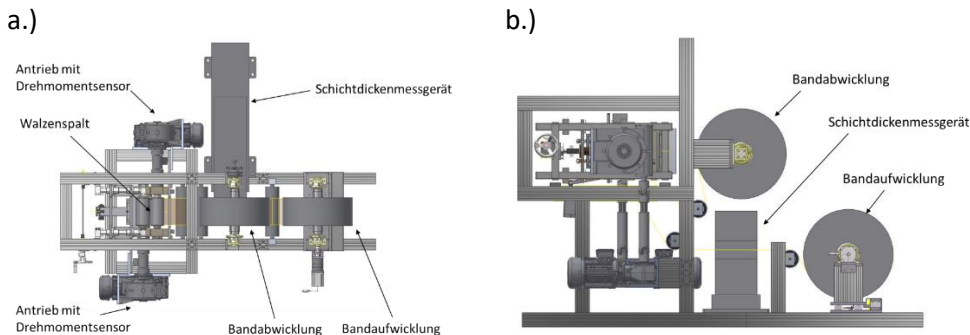


Abbildung 17: Drauf- (a.) und Seitenansicht (b.) auf IWS-Kalanderanlage mit Kennzeichnung der Sensorpositionen

### Messung der Schichtdicke

Essenziell für die Bewertung des hergestellten Trockenfilmes ist die Schichtdickenmessung. Diese soll nicht invasiv, sondern berührungslos erfolgen. Zudem soll es möglich sein, die Schichtdicke über die gesamte Bandbreite zu ermitteln. Da sich die Foliendicke im Bereich 5-20  $\mu\text{m}$  und die Schichtdicke zwischen 70 – 150  $\mu\text{m}$  bewegt, sollte eine Messgenauigkeit von besser als 0,1  $\mu\text{m}$  möglich sein. Zudem waren auch hier Abtastraten im kHz-Bereich gefordert und wurden entsprechend für das zu beschaffende Messgerät berücksichtigt.

Als bevorzugtes und zu integrierendes Messverfahren wurde sich für die Lasertriangulation entschieden.

Der Messbügel der Fa. Indev konnte erfolgreich in die IWS-Kalanderanlage integriert werden.

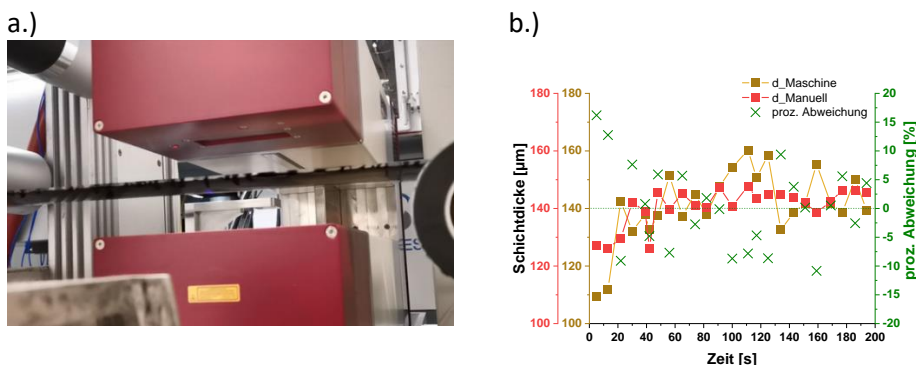


Abbildung 18: a.) Foto des eingebauten Schichtdickenmessgerätes bei einer Validierungsmessung und b.) Gegenüberstellung der im Rahmen eines Validierungsversuches durchgeführten Schichtdickenmessung des Messbügels über 3 min ( $v = 58 \text{ mm/s} = 3,5 \text{ m/min} \rightarrow 10,5 \text{ m}$  Beschichtungslänge) verglichen mit einer nachgelagerten manuellen Messung mittels Auswiegen und Schichtdickenmessung von Stanzlingen und der prozentualen Abweichung beider Messvarianten

In Abbildung 18 zeigt sich nach Einfahren des Prozesses über 30 s nachfolgend noch eine Abweichung der maschinellen Messung des Bügels verglichen mit der manuellen Messung von  $\pm 10 \%$  bei der Schichtdicke. Die Daten zeigen, dass das System fähig ist, die Schichtdicke zu erfassen. Für weitere Versuche im Projektverlauf wurden die Rahmenbedingungen, wie Spannung der Folie und Randbeschnitt, verbessert. Nach Optimierung der softwareseitigen Auswertung resultiert dies in einer höheren Messgenauigkeit (vgl. Abbildung 20)

### SPS Programmierung

Für die Einbindung der Sensoren und für den geplanten späteren Export der Daten auf einen Server wurde ein performanter Beckhoff IPC C6025 beschafft. Die umgesetzte Variante erlaubt höchstmögliche Flexibilität. Es können vollautomatisch Datensätze während des noch manuell

gesteuerten Prozesses erfasst werden. Für die externe Steuerung wurden alle Konfigurationen vorgenommen.

Die Funktion des Einlesens aller Sensordaten in die SPS konnte erfolgreich integriert werden. Die Entwicklung der Bedienoberfläche zum Ansteuern des Systems und zum Aufzeichnen der Daten wurde abgeschlossen und befindet sich bereits im Einsatz. Ebenso wurde erfolgreich die Elektroplanung und Einbringung der Komponenten in einen kompakten Schaltschrank abgeschlossen (Abbildung 19).

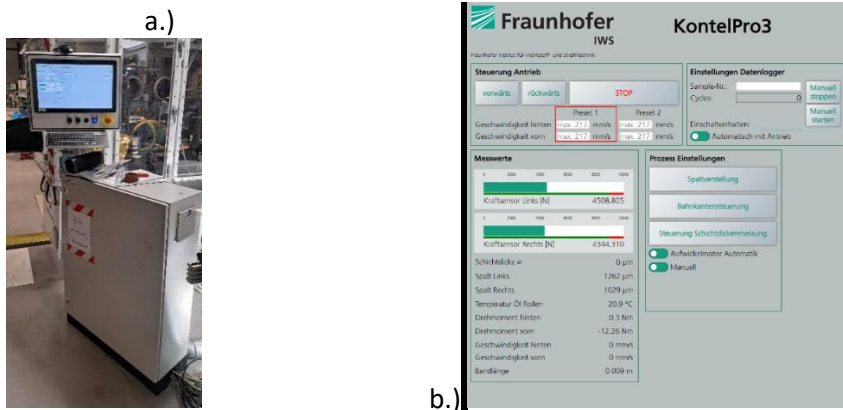


Abbildung 19: a.) Foto der HMI und des Schaltschranks, b.) Bedienoberfläche mit Steuerungsfunktionen und Ausgabe der Messwerte in Echtzeit

Durch die Erweiterung des Systems mit mehr Sensoren konnte auch der Automatisierungsgrad gesteigert werden. Für die Fernsteuerung des Systems durch eine KI konnte die vollautomatische Spaltverstellung umgesetzt worden. Ebenso wird kontinuierlich die Regelung der Bahnkantensteuerung verfeinert und automatisiert. Die vorher vollständig manuelle Einrichtung des Kalenders durch den Benutzer wurde nun weitestgehend durch eine geführte und automatisierte Einrichtung substituiert.

### **Kontinuierliche Versuche mit gesamtheitlicher Datenerfassung**

Durch die Versuche wurde ein Gemisch und ein Parametersetting für den IWS Kalender, als optimal für kontinuierliche Versuche geeignet, in Erfahrung gebracht. Dieses wurde durch das IFAM in mehreren kg zur Verfügung gestellt und für kontinuierliche Prozesse angewendet.

Die Beladung der trocken hergestellten Elektrodenschicht wurde mind. alle 50 cm manuell mittels Bügelmessschraube erfasst, um die erhaltenen Messwerte mit den inline-Messwerten der Schichtdickenmessung zu vergleichen. Außerdem erfolgte ebenfalls manuell die Messung des Durchgangswiderstandes und der Adhäsion der Elektrodenschicht zur Stromableiterfolie an ausgewählten Proben. Alle Daten wurden in die Datenbank überführt, um diese als Datenbasis für die KI-Modellierung zugänglich zu machen.

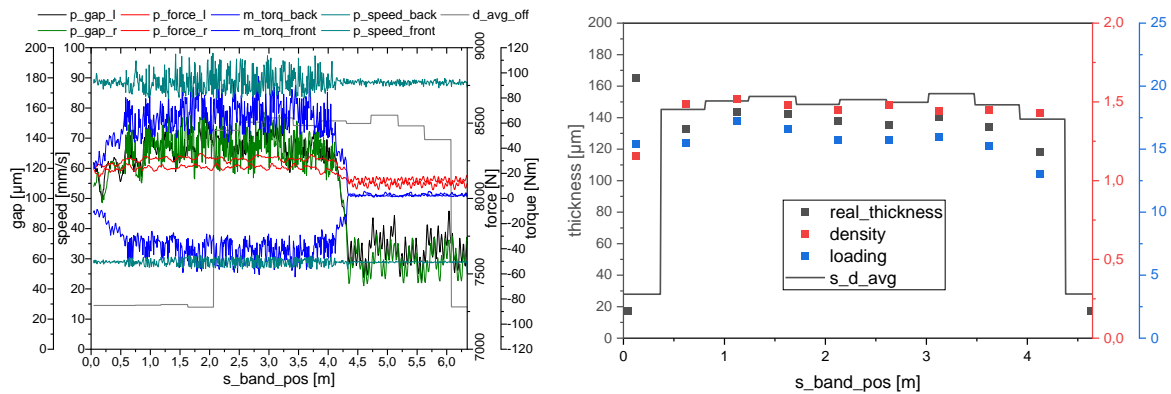


Abbildung 20: Links: Inline-Datenerfassung der Probe 36\_31\_21\_434\_XXX\_094, rechts: Vergleich der Schichtdickenmessung zwischen inline gemessen und nachgelagert manuell mit Bügelmessschraube erfasst

Abbildung 20 zeigt sämtliche, beispielhaft an einer 4 m langen DRYtraec-Probe, erfassten Prozessdaten der vollumfänglich im Rahmen des AP 2.2 integrierten Sensoren (Spalt, Kraft, Drehmoment, Geschwindigkeit, Schichtdicke). Die Abtastrate der Sensorwerte liegt bei ca. 5 kHz. Die Schichtdicke mithilfe des INDEV-Messbügels kann theoretisch bis 1 kHz erfasst werden. Aufgrund der geringen Beschichtungsgeschwindigkeiten werden die Prozessdaten derzeit mit einer Frequenz von 1 Hz aufgezeichnet. Ein kürzeres Intervall würde nur zu mehr Daten aber nicht zu mehr Informationen führen. Technisch ist es allerdings möglich, die Prozessdaten bis hin zu deren nativen Abtastrate aufzuzeichnen.

Die Prozessparameter werden zeitgleich erfasst, die Schichtdicke aufgrund von baulichen Gegebenheiten und Gerätefunktionalitäten ca. 1,2 m später. Zwischen der realen und gemessenen inline Schichtdicke gibt es eine Abweichung von 10 – 15  $\mu m$ . Der Grund dafür sind die verschiedenen Messmethoden. Für die offline Schichtdickenmessung wird eine Bügelmessschraube verwendet, welche praktisch nur die Spitzen der Schicht erfasst. Online wird die Schichtdicke über Lasertriangulation gemessen.

### Datentransfer

Sämtliche Prozessdaten wurden auf einen IWS internen Server zwischengespeichert. Zweimal am Tag wurde die eigene Datenbank nach neuen Datensätzen durchsucht und bei Bedarf der Transfer zum ICT gestartet. Ein antwortendes Datenpaket des ICT bestätigte den erfolgreichen Upload und verhinderte somit die Duplizierung von Datensätzen. Die Synchronisationszeiten wurden deutlich verkürzt, um eine Echtzeit Datenübermittlung zu erreichen. Vorteil dieser Variante ist die Redundanz. Daten, welche nicht ans ICT übertragen werden konnten, wurden bis zur Problembeseitigung am IWS zwischengespeichert.

### Track And Trace

Track and Trace wurde hardwareseitig vorbereitet. Die Prozessdaten der jeweiligen Probe wurden aufgezeichnet. Ein Tintenbeschriftungsgerät wurde angeschafft und für den Einsatz getestet. Mit ihm ist es möglich beispielsweise alle 25 cm die Probennummer sowie eine fortlaufende Nummerierung im Klartext als auch Datenmatrix Code aufzudrucken. Letzteres hat sich in Vorversuchen als hilfreich erwiesen, da auf sehr begrenztem Raum viel Information abgespeichert und automatisiert auch wieder ausgelesen werden kann.

## **KI-Steuerung**

Der IWS Kalendar wurde für eine KI-Steuerung befähigt. Sämtliche Aktoren können per SPS gesteuert werden. Die selbstdosierende Pulverzufuhr, indem Pulver als Schüttung gleichmäßig in den Kalandereinzug gebracht wird, ist im Rahmen der KontElPro-Entwicklungsaktivitäten hinreichend. Das Konzept zur Steuerung wurde erarbeitet. Ein Python-Skript kann auf dem Teststandrechner des IWS ausgeführt werden. Lokal kann auf das URL-basierte Netz der Daten zugegriffen werden, um Experimente auszuführen usw.

## **Teilprojektspezifische Arbeiten des Fraunhofer ICT**

Ziel der Arbeiten des ICT in AP3 war die Entwicklung eines Softwaresystems zur automatisierten Verarbeitung von Daten und Informationen, die bei der Produktion/Charakterisierung und bei elektrochemischen Messungen am Fraunhofer IFAM (Mischen/Extrusion) und Fraunhofer IWS (Trockentransfer) angefallen sind. Die Daten/Informationen wurden in einer lokalen Datenbank des ICT gespeichert, aufbereitet, vernetzt und allen Projektpartnern zur Verfügung gestellt. Insbesondere wurden dem ZSW für die KI-Entwicklung über eine Schnittstelle strukturierte Daten bereitgestellt.

### **AP3 Datenbank**

#### **AP3.1 Auslegung, Planung, Installation der Datenbank**

Für die Anforderungen des Projekts KontElPro wurde erfolgreich eine Datenbank geplant, ausgeschrieben und implementiert. Diese Datenbank wurde so konzipiert, dass externe Partner darauf zugreifen können. Aufgrund verwaltungstechnischer Herausforderungen und der coronabedingten Chipkrise kam es, wie bereits im Zwischenbericht erwähnt, zu Verzögerungen im ursprünglichen Zeitplan. Die Lieferung erfolgte letztlich Ende März 2022, und der Aufbau sowie die Installation konnten bis Ende August 2022 abgeschlossen werden. Seitdem läuft die Datenbank stabil und hat die erwarteten Anforderungen voll erfüllt.

#### **AP3.2 Programmieren eines SQL-Servers**

Ziel des ICT war es, einen SQL-Server zu programmieren, der offline und inline-Daten der Projektpartner strukturiert und nutzerfreundlich einsammelt. Nach der Installation der Datenbank im August 2022 erhielten alle Projektpartner passwortgeschützten Zugang, und es wurden zahlreiche Projektdaten sicher gespeichert. Es wurden verschiedene Funktionen implementiert. Die folgenden Abschnitte bieten einen detaillierten Überblick über die gewonnenen Erkenntnisse.

- Der SQL-Server wurde um einen Fileserver erweitert, der verschiedenste Dateiformate, einschließlich Bilddateien, speichern kann. Kontinuierlich wurden weitere Formate integriert, und Erfolgs- sowie Fehlermeldungen hinzugefügt, um die Nutzer über den Fortschritt der Datenverarbeitung zu informieren. In diesem Projekt wurde eine Schnittstelle entwickelt, die es ermöglichte, Daten aus dem kontinuierlichen Versuch automatisch in den SQL-Server zu speichern. Eine weitere Möglichkeit wurde geschaffen, indem eine Benutzeroberfläche (Upload-Tab) erstellt wurde, über die die Daten auch manuell hochgeladen werden können.
- Zusammen mit allen Projektpartnern wurde eine gemeinsame Datennomenklatur entwickelt, um Daten aus allen Prozessschritten und von allen Sensoren (Materialdaten, Messdaten, etc.) zuverlässig den jeweiligen Prozessen zuordnen zu können. Ebenso

können dadurch alle Daten dem jeweiligen Produktionsbatch zugeordnet werden, sodass eine Rückverfolgbarkeit sämtlicher Produkte und Proben gewährleistet werden kann. Die entsprechenden Daten werden an der richtigen Stelle der Prozesskette (siehe Abbildung 21) eingefügt und zugeordnet, wodurch eine durchgehende Material-, Proben- und Prozessverfolgung ermöglicht wird. Zudem wurden auch Benutzeroberflächen entwickelt, die es dem Administrator ermöglichen, die Nomenklatur festzulegen und dem Nutzer die definierte Nomenklatur anzeigen.

Basierend auf der gewählten/festgelegten Datennomenklatur kann der Datentyp bzw. der jeweilig zugehörige Prozess automatisch anhand der hochgeladenen oder gespeicherten Dateien erkannt werden. Dazu wird vorab auf der Admin-Seite definiert, welcher Datentyp welchem Prozess bzw. Prozessschritt entspricht.

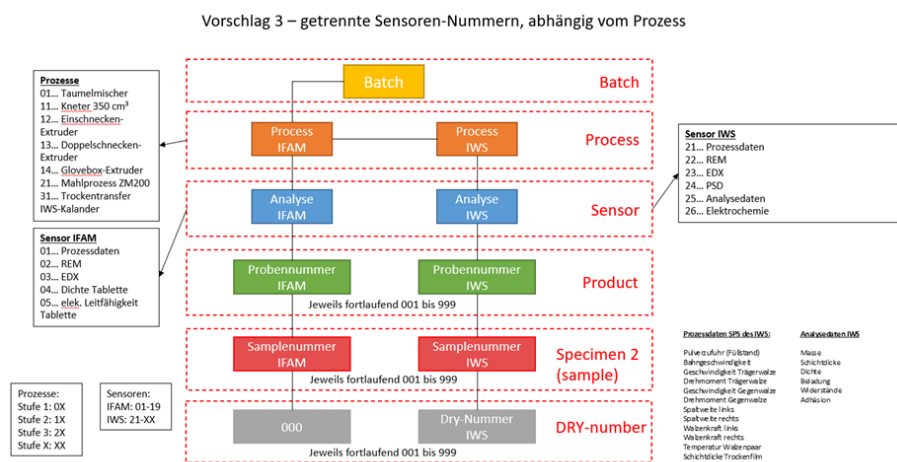


Abbildung 21: Gemeinsame Datennomenklatur im Projekt

- Ein „Display data“-Tab wurde entwickelt (Abbildung 22), um alle gespeicherten Daten aus dem SQL-Server in einer Haupttabelle darzustellen zu können. Die Haupttabelle besteht aus vielen einzelnen Spalten. Diese Spalten enthalten allgemeine Informationen (Nomenklatur-Einträge, standardisierte Daten, Bilddateien, Startdatum, usw.), Informationen über verknüpfte Specimen-Parameter, ausgewertete Parameter für einzelne Messungen sowie Vergleichsmessungen. Zudem wurden Funktionen zur Filterung und Sortierung integriert, um die gewünschten Daten schnell und effizient zu finden. Zusätzlich wurde ein allgemeines Suchfeld für die gesamte Datenbank integriert. Mit dieser Funktion kann die gesamte Datenbank nach einem Eintrag durchsucht werden, und es werden verschiedene Tests angezeigt, bei denen ein Eintrag in einer Spalte dem

gewünschten Suchbegriff entspricht. Funktionen wie Daten bearbeiten, Daten löschen und Daten zusammenführen usw. wurden ebenfalls auf diesem Tab implementiert.

Select	Data Type (main)	Data Type (sub)	Name	Sheet Name	Specimen Parameter	Analysis Scheduling, Alerts	Nomenclature	Batch ID	Dry Number	Process ID	Sensor	Specimen ID	Specimen ID	Employee (Specimen)
<input type="checkbox"/>	Process- and Production Data	Dry transfer	010_31_21_020_003_031.csv	process and machine	Working electrode 010_31_21_020_003_031		Nomenclature 1 (main)	010	031	31	21	020	003	
<input type="checkbox"/>	Process- and Production Data	Dry transfer	010_31_21_020_003_031.csv	sample	Working electrode 010_31_21_020_003_031		Nomenclature 1 (main)	010	031	31	21	020	003	
<input type="checkbox"/>	Process- and Production Data	Dry transfer	010_31_21_020_003_030.csv	process and machine	Working electrode 010_31_21_020_003_030		Nomenclature 1 (main)	010	030	31	21	020	003	
<input type="checkbox"/>	Process- and Production Data	Dry transfer	010_31_21_020_003_030.csv	sample	Working electrode 010_31_21_020_003_030		Nomenclature 1 (main)	010	030	31	21	020	003	
<input type="checkbox"/>	Process- and Production Data	Dry transfer	030_31_21_434_020_094.csv	process and machine	Working electrode 030_31_21_434_020_094		Applied	030	094	31	21	434	020	

Abbildung 22: Datenbankoberfläche mit „Display-Data“-Tab

- Durch Anklicken des Namens (Link) wird der Benutzer auf eine Seite weitergeleitet, auf der alle Daten des ausgewählten Tests angezeigt werden. Ist es ein Bild, wird dieses direkt im Browser dargestellt. Handelt es sich um Messdaten, werden diese in einer Tabelle mit den entsprechenden Werten angezeigt. Zudem hat der Benutzer auch die Möglichkeit, die Daten herunterzuladen.
- Aufgrund der großen Anzahl an Spalten, die in der Haupttabelle angezeigt werden, wurde ein Settings-Tab hinzugefügt. In diesem Tab kann der Benutzer die Spalten auswählen, die in der Haupttabelle je nach Bedarf angezeigt oder ausgeblendet werden sollen. So können unnötige Spalten, die für den Benutzer irrelevant sind, entfernt werden. Dadurch wird eine bessere Übersicht über die Haupttabelle gewährleistet, in der nur die erforderlichen Daten dargestellt werden. Zudem kann die Einstellung für die automatische Erkennung der jeweiligen Datentypen ebenfalls über diesen Tab angepasst werden.
- Es wurden darüber hinaus Schnittstellen zu weiteren Systemen geschaffen:
  - Mit dem Projektpartner ZSW: Zur Dateisuche in der Datenbank und zum Abrufen von abgelegten Mess- und Bilddateien.
  - Zur NoSQL-Datenbank: Beim Speichern oder Bearbeiten von Daten in der SQL-Datenbank bzw. dem Fileserver wird der NoSQL-Server benachrichtigt, dass Änderungen vorliegen, die dann entsprechend aktualisiert werden.

### AP3.3 Programmieren einer NoSQL-Datenbank

Eine NoSQL-Datenbank soll vor allem die Logik im Projekt und in der Prozesskette speichern. NoSQL Datenbanken sind nicht relationale Systeme, die keine festgelegten Tabellenschemata verwenden. Über diese nicht relationale Datenbank werden sämtliche Prozesse in KontEIPPro logisch abgebildet und mit den vielen weiteren Daten und Informationen vernetzt. Die NoSQL-Datenbank läuft wie die SQL-Datenbank auf derselben Hardware, welche in AP3.1 beschrieben wurde. Die NoSQL-Datenbank visualisiert die Daten, die im SQL-Server gespeichert werden und kann durch die Nomenklatur die logische Verknüpfung und Abhängigkeit der Daten und Informationen visualisieren.

- Auch für die NoSQL-Datenbank wurde eine Schnittstelle integriert, um Daten(-strukturen) an die Projektpartner senden zu können. Des Weiteren wurde die entsprechende Schnittstelle zur SQL-Datenbank eingerichtet, deren „Hinweg“ bereits im Kapitel zu AP 3.2 beschrieben wurde.

In der Oberfläche der NoSQL-Datenbank können Zugangsdaten zu verschiedenen SQL-Datenbanken (auch mehreren) gespeichert werden, von welchen Daten in die Prozesskette integriert werden sollen. Dies kann entweder für eine komplette Benutzergruppe bzw. ein Projekt angelegt werden (vom Key-User) oder individuell für einzelne Benutzer (Standard-User).

- In Abbildung 23 ist eine automatisch eingelesene Messung aus einer Standard-User-Ansicht dargestellt. Einige Daten wurden bereits aus dem Header der Datei extrahiert und korrekt zugeordnet. Der Benutzer hat zudem die Möglichkeit, zusätzliche Informationen zu diesem Datensatz manuell hinzuzufügen.

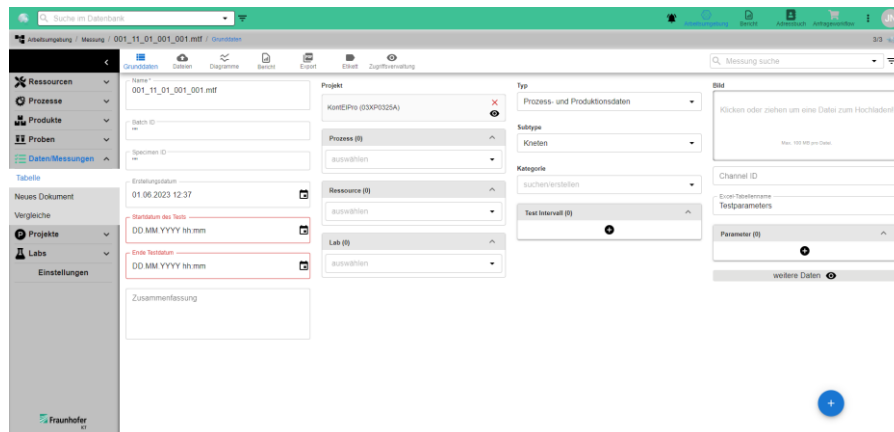


Abbildung 23: Datenbankoberfläche für eine Messung

Dieses Konzept gilt nicht nur für Messdaten, sondern auch für andere Dateitypen wie Projekte, Proben, Maschinen, Produkte und Prozesse. Je nach Arbeitsbereich des Benutzers kann er auf die spezifischen Daten der jeweiligen Datei zugreifen und diese einsehen.

Zusammengefasst ermöglicht dieses System dem Benutzer ein automatisches Einlesen und Zuordnen von Daten aus Datei-Headern, ein manuelles Ergänzen von zusätzlichen Informationen zu den Datensätzen und Zugriff auf spezifische Dateinformationen je nach Kontext (Projekte, Proben, Maschinen, Produkte, Prozesse).

- Durch die gewonnenen Daten kann die NoSQL-Datenbank alle Informationen zusammenführen, sogar projektübergreifend. In Abbildung 24 sehen wir eine Prozesskette, die aus drei unterschiedlichen Prozessketten des IFAM besteht, wobei jede dieser Ketten wiederum aus zwei Prozessen zusammengesetzt ist. Diese Prozesse des IFAM laufen schließlich in eine Prozesskette des IWS zusammen, die ebenfalls aus zwei einzelnen Prozessen besteht. Die Visualisierung wurde so entwickelt, dass die verschiedenen Pfade farblich hervorgehoben werden, was eine intuitive Nachverfolgung ermöglicht. Gegen Ende des Projekts wurde die Menge der generierten Daten so überwältigend, dass die Übersichtlichkeit in der Darstellung leider etwas leidet und deshalb noch weiterer Verbesserungen bedarf. Dazu wurde die Software erweitert: Nun kann der Benutzer den Produktpfad auswählen und ein Endprodukt markieren. Dieser ausgewählte Pfad wird dann erneut farblich hervorgehoben, wodurch eine klare und übersichtliche Darstellung gewährleistet ist, wie in Abbildung 25 zu sehen.

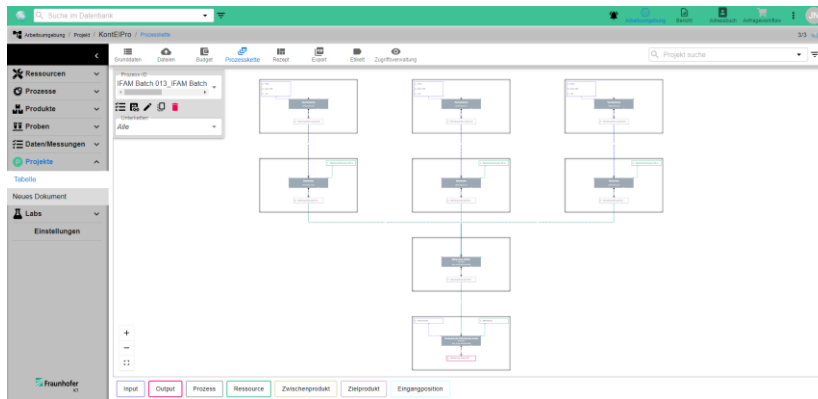


Abbildung 24: Prozessketten-Ansicht. Prozesskette zusammengesetzt aus drei Einzelprozessen unterschiedlicher Projektpartner.

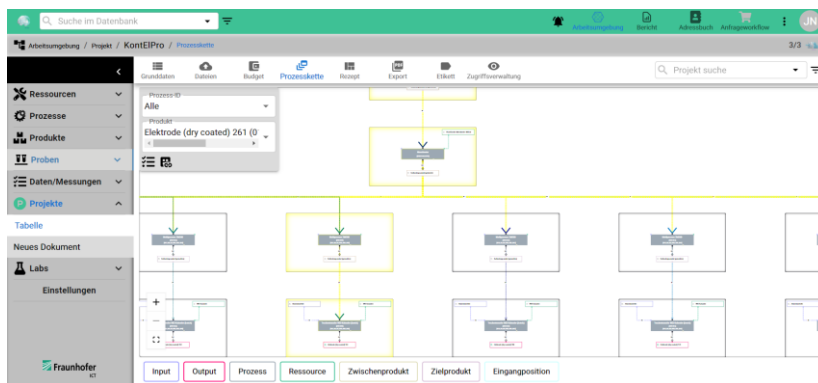


Abbildung 25: Farbliche Hervorhebungen in der Prozesskette ermöglichen ein einfaches Track- und Trace der (Ziel-)Produkte.

- Zusammengefasst bietet dieses System eine nahtlose Integration aller projektübergreifenden Daten in einer übersichtlichen NoSQL-Datenbank und eine Visualisierung komplexer Prozessketten mit farblicher Hervorhebung für einfaches Track- und Trace der Produkte und Edukte von Interesse für die jeweiligen (zusammengesetzten) Prozessketten.

### AP3.4 Programmieren eines Auswerte- und Visualisierungswerkzeugs, KPI-Berechnung

Die Funktionen der Datenbank-(Software) wurden dahingehend erweitert, dass nun auch automatisierte Parameter- und Zielwertberechnungen der Datensätze von IFAM und IWS durchgeführt werden können. In Abbildung 26 ist die Datenbankschnittstelle dargestellt. Hier werden beispielhaft die Parameter „Density“ und „Loading of LFP“ als automatisch errechnete Werte dargestellt. Die berechneten Werte werden dann automatisch in das entsprechende Fenster übernommen. Sobald sich einer der Werte ändert, erfolgt eine sofortige Neuberechnung.

Abbildung 26: Parameterfenster mit automatischer Berechnung von Zielwerten

### **AP3.5 Prozesssteuerung – auch durch KI**

In der Datenbank laufen alle Informationen zu den Prozessen zusammen. Nach Entwicklung der KI in AP4 (siehe ZSW-Bericht) war das Ziel, dass diese auch in der Lage ist, steuernd in die Prozesse einzugreifen. Weichen die inline-Prozesssensordaten von Zielwerten der KI oder von vorgegebenen spezifischen Prozesstoleranzen ab, so sollen Anlagen am IWS und IFAM nachgeregelt werden. Die neuronalen Netze sind einsatzbereit und können zur Systemsteuerung verwendet werden. Auf Grund der beschränkten Zeit konnte die Implementierung der vollständigen Automatisierung nicht abgeschlossen werden. Ein manueller Eingriff nach Vorgabe der KI wurde realisiert und implementiert. Der Code kann auf den Teststandrechnern ausgeführt werden. Soll-Parameter, die ausgegeben werden, müssen noch von Hand an den Anlagen eingestellt werden.

### **AP3.6 Datenaufbereitung für die KI-Entwicklung**

Ziel des Arbeitspakets war die Strukturierung der gewonnenen Daten und das Erstellen einer Schnittstelle, um alle anfallenden Daten geeignet an das ZSW weitergeben zu können. Da ständig Anpassungen an der Datenstruktur im Projekt stattfanden, sind auch durchgehend kleinere Arbeiten im AP3.6 angefallen, um dem ZSW die benötigten Daten in der Struktur liefern zu können. Die z.B. in Abbildung 26 automatisch berechneten Werte wurden so auch an die KI vom ZWS weitergegeben werden. Dafür wurden die Daten in der komprimierten Form benötigt, wozu eine API geschrieben wurde. Der jeweilige Datensatz besteht aus mehreren Datenblöcken, die zusammengeführt werden und als Ganzes an das ZSW gesendet wurden. Die Parameter „Loading of LFP“ und auch der „Density“-Wert sind im Block „parameters“ zu finden. Die Zeitreihendaten für die kontinuierlichen Daten sind außerdem in den einzelnen Datenblöcken aufgenommen. Die genaue Datenauswertung und KI-Entwicklung sind im ZSW-Bericht näher erläutert. Die API ist von Seiten des ICT geschützt. Das heißt, dass jeder API-Nutzer über einen Token verfügen muss, welchen ihn im System identifiziert. Weiterhin wurde die Schnittstelle so umgesetzt, dass diese zunächst nur Daten lesen kann und keine Rückspeicherung möglich ist. Dazu wurden im Projekt andere Schnittstellen genutzt. Darüber hinaus wurden weitere Schnittstellen zu weiteren Systemen geschaffen, speziell für die kontinuierlichen Versuche im Projekt. Die empfangenen Daten zu den kontinuierlichen Versuchen des IWS setzten sich aus Proben-, Prozess- und Maschinendaten zusammen. Dabei wurden in der Datenbank die Prozess- und Maschinendaten zusammen in einer Datei und die Probandaten in einer weiteren Datei gespeichert. Diese Struktur erleichterte die weitere Verarbeitung der Daten in AP3.3 erheblich. Die Daten vom IWS können auch Daten aus verschiedenen Nomenklaturen enthalten. Daher wurde auch der Dateiserver entsprechend angepasst. Vor dem Speichern wird geprüft, ob die Nomenklatur bereits in der Datenbank vorhanden ist. Ist dies der Fall, werden die neuen Daten in die bestehende Datei eingefügt. Andernfalls wird eine neue Datei mit der Nomenklatur als Dateinamen erstellt und die Daten dort abgelegt.

Die Schnittstelle zur NoSQL-Datenbank wurde ebenfalls optimiert, um eine automatische Übertragung aller gespeicherten Daten zu gewährleisten. Diese Daten werden dann strukturiert und für die Datenauswertung sowie die KI-Entwicklung an das ZSW übermittelt.

### **Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises.**

**Personalkosten:** Durchführung der umfangreichen wissenschaftlichen Arbeiten (siehe Sachbericht).

**Reisekosten:** Geplante Reisekosten konnten aufgrund pandemiebedingter Verschiebungen nicht vollständig abgerufen werden. Ein Teil der Reisekosten wurde für die Teilnahme an der IBPC 2023 aufgewendet. Dabei wurden die bis dato wichtigsten Projektergebnisse in Form eines Postervortrags präsentiert.

### **Material:**

#### IFAM:

- Lithiumeisenphosphat (LFP), 50 kg
- Polyethylenoxid (PEO), 63.5 kg
- Lithiumtrifluorsulfonylimid (LiTFSI), 10 kg

#### IWS:

- Rohmaterialien für die Elektrodenbeschichtung
- Konstruktions-Material für die Integration von Sensorikkomponenten
- ITEM-Profile und mechanische Komponenten für Umbau sowie Erweiterung des IWS-Kalanders

### **Invest:**

#### ICT:

- 2x C220 M5 Server inkl. DS224C-Shelf
- 24x 960GB SSD-Festplatten
- 2x Nexus N3K Switch
- Lizenzen und Installation

#### IFAM:

- Drucksensor für den Extruder in der Glovebox
- Kühlband für den Extruder in der Glovebox zur kontinuierlichen Trockenfertigung von polymeren Festkörperkathoden

#### IWS:

- Beckhoff Steuerserver & Steuer-PC IPC C6025
- Dickenmesssystem OTM-LC60 der Fa. INDEV
- Drehmomentantriebe mit Drehmomentsensor der Fa. KTR

### **Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten.**

Alle geleisteten Arbeiten im Projekt KontElPro waren notwendig und angemessen. Lieferengpässe, insbesondere bei einzelnen Komponenten sorgten für zeitliche

Verzögerungen im Projekt. Durch kostenneutrale Verlängerung und teilweise leichte Umplanungen konnten die wissenschaftlichen Ziele trotz der Verzögerungen alle adressiert werden.

**Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere die Verwertbarkeit des Ergebnisses – auch konkrete Planungen für die nähere Zukunft - im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans**

Auf Grund der erfolgreichen Projektdurchführung und der vielversprechenden Zukunftsaussichten zum Einsatz der entwickelten Software und der zugehörigen Verfahren, Steuerungen und Messmethoden, wird eine zweite Projektphase angestrebt, in welcher die Ergebnisse auch auf weitere Materialien und Zusammensetzungen angewendet werden sollen.

Die Datenbanksoftware wird in einem ebenfalls vom BMBF-geförderten Projekt (AgiloBat2; FKZ:03XP0369B) bis zu dessen Projektende (09/2024) und auch darüber hinaus im Bezug auf weitere Einsatzmöglichkeiten erweitert, weiterentwickelt und verbessert.

Teile der Arbeiten im Projekt KontElPro sollen über gemeinsame Forschungsprojekte oder Industrienaufträge deutschen KMUs und Industrieunternehmen (z.B. Software-, Maschinen-, Anlagenherstellern) bereitgestellt werden.

**Während der Durchführung des Vorhabens bekannt gewordene Fortschritt auf dem Gebiet bei anderen Stellen.**

Parallel zu den Arbeiten im Projekt wurden auch ähnliche Versuche mit NMC Materialien von Oh *et al.* durchgeführt. Hierbei wurde allerdings nur im diskontinuierlichen Prozess geknetet, dabei aber sowohl die Menge an PTFE als auch die Knetzeit systematisch variiert. Anders als bei den Versuchen mit LFP ist hier deutlich schneller ein „Überkneten“ und eine damit einhergehende Zerstörung der PTFE Fibrillen zu beobachten. Ein häufiges Ziel für die Trockenbeschichtung ist neben der Vermeidung / Reduktion des Lösungsmittels auch eine Erhöhung der Kapazität der hergestellten Elektroden. Solche dicken Elektroden mittels Trockenverarbeitung durch PTFE haben auch Tao *et al.* untersucht und dabei NMC Kathoden mit Flächenkapazitäten von  $6,6 \text{ mAh}\cdot\text{cm}^{-2}$  und Graphitanoden mit Flächenkapazitäten von  $6,0 \text{ mAh}\cdot\text{cm}^{-2}$  erhalten. Diese Elektroden sind allerdings sehr stark auf Energiedichte getrimmt wobei die Leistungsdichte deutlich abnimmt ( $1\text{C}$  Kapazität  $< 40 \text{ mAh}\cdot\text{g}^{-1}$ ).

H. Oh, G. Kim, B. Un Hwang, J. Bang, J. Kim, K.-M. Jeong, *Development of a feasible and scalable manufacturing method for PTFE-based solvent-free lithium-ion battery electrodes*, *Chemical Engineering Journal*, Volume 491, 2024, 151957, <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.151957>.

R. Tao, B. Steinhoff, X.-G. Sun, K. Sardo, B. Skelly, H.M. Meyer, C. Sawicki, G. Polizos, X. Lyu, Z. Du, J. Yang, K. Hong, J. Li, *High-throughput and high-performance lithium-ion batteries via dry processing*, *Chemical Engineering Journal*, Volume 471, 2023, 144300, <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.144300>.

### **Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen**

Ausgewählte Projektergebnisse wurden in Vorträgen auf internationalen Konferenzen vorgestellt:

- IBPC 2022  
„Automated data management and process parameter determination in R&D cell production“

Ausgewählte Projektergebnisse wurden als Poster auf internationalen Fachtagungen vorgestellt:

- IBPC 2023
  - 1) „AI-based intelligent quality assurance and process monitoring for continuous, solvent-free electrode manufacturing“
  - 2) “Production of PEO-based composite cathodes for all solid-state batteries using solvent-free polymer extrusion”
  - 3) “Continuous, solvent-free electrode manufacturing with intelligent quality assurance and process monitoring coupled with AI”
- DRY Coating Forum 2023  
„DRYtraec<sup>®</sup> process optimization by data acquisition and a self-learning AI algorithm“

Eine ausführliche Liste ist Teil III – Erfolgskontrollbericht unter 2 d) beigefügt.