

Kurzbericht zum BMBF Projekt HOMER

Ursprüngliche Aufgabenstellung

Das Projekt HOMER hatte das Ziel, einen neuen und einzigartigen Messaufbau zu etablieren, mit dem es möglich ist, die Kinetik von Trocknungs-, Sorptions- und Desorptionsprozessen von Batteriematerialien quantitativ (mittels einer Messzelle mit Magnetschwebewaage) hochaufgelöst und zusätzlich komponentenspezifisch (mittels eines FTIR-Spektrometers) über einen weiten Temperatur- und Druckbereich zu erforschen.

Ablauf des Vorhabens

Zunächst wurden die technischen Anforderungen definiert und festgelegt. Darauf folgte der Beschaffungsprozess, der aufgrund verschiedener Probleme in der Lieferkette deutlich länger dauerte als geplant. Daher wurde das Projekt zweimal um je sechs Monate verlängert. Es wurden individuelle Bauteile konstruiert und gefertigt. Nach einem Testaufbau für die Prozessgasführung und ersten Tests wurde mit dem Aufbau und der Inbetriebnahme der einzelnen Systemkomponenten begonnen (u. a. Glovebox, Magnetschwebewaage, FTIR-Spektrometer). Im letzten Schritt wurde die Kopplung von Sorptions- und Spektroskopieeinheit umgesetzt.

Wesentliche Ergebnisse

- Die entwickelte Versuchsanlage erlaubt die Erforschung komplexer Vorgänge bei der Trocknung und dem Feuchtmanagements von Batteriematerialien.
- Die beschaffte Glovebox erlaubt die präzise Einstellung der für den sicheren Umgang mit sensiblen und toxischen Batteriematerialien erforderlichen Atmosphärenbedingungen.
- In der beheizbaren Vakuumschleuse der Glovebox können Materialproben mittels frei programmierbarer Heiz- und Spülzyklen bei definierten Bedingungen getrocknet werden.
- Der innovative Aufbau integriert eine Magnetschwebewaage mit Messzelle in die Glovebox und verbindet die Messzelle mit einem FT-IR-Spektrometer für die Inline-Analyse der austretenden Gase. Diese Kopplung aus gravimetrischer und spektrometrischer Messung ermöglicht die Aufzeichnung hochaufgelöster und komponentenspezifischer Trocknungsverläufe.
- Die realisierte Anlagenperipherie für experimentelle Untersuchungen der Messzelle erlaubt die flexible Einstellung von Temperaturen, Drücken und Durchflüssen über weite Bereiche sowie die Erfassung umfangreicher Messdaten.
- In den Versuchsreihen konnte eine gute Übereinstimmung von gravimetrisch und spektroskopisch gemessenen Stoffströmen während der Trocknung bestätigt werden.

Abschlussbericht im BMBF-Rahmenprogramm

„Vom Material zur Innovation“

Vorhabensbezeichnung: HOMER – Hochpräzise Ermittlung von Multikomponenten-Restlösemittel in Elektrodenherstellung und Batterierecycling	
Zuwendungsempfänger: Karlsruher Institut für Technologie (KIT)	Förderkennzeichen 03XP0463
Projektleiter: Prof. Dr.-Ing. Wilhelm Schabel Dr.-Ing. Philip Scharfer	Berichtszeitraum 01.09.2022 - 31.08.2024
	Bewilligungszeitraum 01.09.2022 - 31.08.2024

I. Eingehende Darstellung

I.1 Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen (Ergebnisdarstellung) mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

Im Rahmen des Investitionsprojektes HOMER wurde eine neue und weltweit einzigartige Versuchsanlage erfolgreich konzipiert, aufgebaut und in Betrieb genommen. Dieser eigens konzipierte Messaufbau ermöglicht es, die Kinetik von Trocknungs-, Sorptions- und Desorptionsprozessen von Batteriematerialien quantitativ (mittels einer Messzelle mit Magnetschwebewaage) hochaufgelöst und zusätzlich komponentenspezifisch (mittels eines FTIR-Spektrometers) über einen weiten Temperatur- und Druckbereich zu erforschen.

Eine maßgeschneiderte Glovebox erlaubt eine präzise Einstellung der für den sicheren Umgang mit Batteriematerialien erforderlichen Atmosphärenbedingungen. Die teilweise Einkopplung einer Magnetschwebewaage in die Glovebox ermöglicht dabei die gravimetrische Erfassung von Trocknungs- und Sorptionsvorgängen von Materialien, die aufgrund ihrer Sensitivität gegenüber Wasser und Sauerstoff und/oder ihrer Toxizität nicht an der Umgebungsluft exponiert sein sollen. Ein FT-IR-Spektrometer, das kontinuierlich die Zusammensetzung der Gasphase analysiert, bietet die Möglichkeit, die Lösemittelfreisetzung bei der thermischen Behandlung komponentenspezifisch aufzulösen.

Arbeitspaket 1: Beschaffungsprozess

Der Beschaffungsprozess der benötigten verfahrenstechnischen Anlagenkomponenten sowie der zugehörigen Mess- und Regelungstechnik für die Versuchsanlage war aufgrund der Lieferkettenproblematik, v.a. in den Jahren 2022 und 2023, zeitlich z.T. erheblich verzögert, da einzelne Anlagenteile deutlich verlängerte Lieferzeiten aufwiesen als üblich. Im gesamten Projektverlauf wurden angekündigte Liefertermine nicht eingehalten und teils mehrfach verschoben. Die Magnetschwebewaage und des FT-IR-Spektrometers als zentrale Anlagenbestandteile wurden im Dezember 2022 bzw. im November 2023 geliefert. Die Lieferung der Steuerungsbox für Volumenstrom und Druck in der Anlage war um 8 Monate verspätet. Dies führte insgesamt zu einer erheblichen Beeinträchtigung beim Aufbau der Anlage. Da die Glovebox den Kern der Gesamtanlage darstellt, mit dem die Magnetschwebewaage physisch verbunden werden musste, konnte die Detailplanung der Anlagenperipherie nicht vor der Inbetriebnahme der Glovebox selbst erfolgen. Das Projekt wurde daher zwei Mal um jeweils 6 Monate verlängert. Die Beschaffung aller erforderlichen

Komponenten konnte im Februar 2024 mit der Lieferung der Glovebox abgeschlossen werden, womit AP 1 beendet und MS 1 („Abschluss des Beschaffungsprozesses – Bestellung/Ausschreibung einzelner Systemkomponenten ist erfolgt“) erreicht wurde.

Im Zuge der Beschaffung wurde in enger Abstimmung und Zusammenarbeit mit Herstellern von Massenspektrometern deutlich, dass es für die Identifikation und Quantifizierung der relevanten, in den geplanten Untersuchungen auftretenden Substanzen im Abgas keinen oder nur einen geringen Mehrwert gegenüber dem ebenfalls beantragten FT-IR-Spektrometer beisteuern würde. Nach genehmigter Umwidmung wurden das zunächst genehmigte Massenspektrometer sowie das Pyrometer nicht beschafft. Dies erlaubte die kostenneutrale Deckung von Mehrkosten durch Preissteigerungen bereits bewilligter Einzelpositionen seit Projektstart sowie zusätzliche Investitionen für die Glovebox durch eine umfangreichere Ausstattung. Der Mehrgewinn an experimentellen Möglichkeiten durch die umfangreicher ausgestattete Glovebox überwiegt den Mehrgewinn an Messmöglichkeiten durch das Massenspektrometer.

In enger Kooperation mit einem Glovebox-Hersteller wurde eine Glovebox konzeptioniert, die den wesentlichen aktuell bekannten, anspruchsvollen Anforderungen in der Batterieforschung gerecht wird. Die beschaffte Glovebox mit einem vollautomatischen Gasreinigungssystem verfügt über eine große, beheizbare (150 °C) Vakuumschleuse mit beidseitig ausziehbarem Tablett. Die Möglichkeit, Heiz- und Spülzyklen der Schleuse mit definierten Temperatur- und Druckniveaus frei zu programmieren, erlaubt die Trocknung von Batteriematerialien bei definierten Bedingungen. Durch die automatische Befeuchtung mit Feuchteregelung und die automatische Klimatisierung (+- 2 K) sind definierte Atmosphärenbedingungen einstellbar, wobei Taupunkte zwischen 10 °C und -60 °C vorgegeben werden können. Die Verläufe von Druck und Temperatur in der Schleuse und der Box (zusätzlich Feuchte) werden kontinuierlich aufgezeichnet. In der linken Seitenwand wurden drei und in der Rückwand zwei Montageplatten eingebaut, um die für die Anlage benötigten Durchführungen von Fluiden und Kabeln realisieren zu können. Zusätzlich ist die Deckenplatte demontierbar ausgeführt, um die Integration der Magnetschwebewaage zu ermöglichen. In einer abdeckbaren Vertiefung im Boden der Glovebox ist Platz für ein Folienschweißgerät, um sensible/toxische Proben vor dem Ausschleusen zu versiegeln.

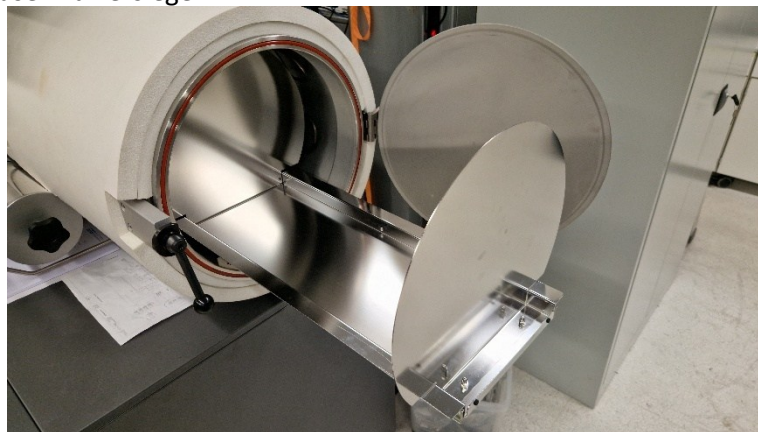


Abbildung 1: Beheizbare Vakuumschleuse mit ausziehbarem Schiebetablett.

Die Magnetschwebewaage dient zur Aufzeichnung zeitlicher Massenverläufe von Proben bei Experimenten zu Trocknung und Sorption. Eine Magnetschwebekupplung erlaubt es, Massenänderungen von Proben innerhalb einer geschlossenen Messzelle mit einer Analysenwaage außerhalb der Messzelle hochgenau (Proben von bis zu 60 g bei Auflösung von 10 µg) zu wiegen.

Das FT-IR-Spektrometer ermöglicht die Inline-Analyse der Abgase aus der Messzelle der MSW über einen weiten Konzentrations-, Druck- und Gasvolumenstrombereich. Mit der Analysesoftware und

den Kalibrierungsdaten für Batterieabgase erfolgt bei hohen Messraten und hoher spektraler Auflösung eine simultane Detektion, Identifikation und Quantifizierung der relevanten Substanzen.

Arbeitspaket 2: Fertigung individueller Bauteile

In AP 2 wurde ein CAD-Modell erstellt, um die Entwicklung eines Konzeptes für die Einkopplung der Magnetschwebewaage in die Glovebox, die Entwicklung eines Konzeptes für die Messzelle sowie die Planung der Anlagenperipherie zu unterstützen. Auf dieser Grundlage wurden in der institutseigenen Werkstatt und in externen Werkstätten die dafür benötigten Bauteile gefertigt.

Um die Einkopplung der MSW zu ermöglichen, musste die werkseitig vorhandene Deckenplatte der Glovebox durch eine Deckenplatte mit Aussparung ersetzt werden. Für die Durchführung von Kabeln (für MSW und Sensoren) sowie von Schläuchen (Thermoöl) waren Montageplatten mit passenden Bohrungen nötig. Dazu wurden eine speziell angepasste Deckenplatte und 5 Montageplatten konstruiert und gefertigt, um diese anstelle der werkseitig vorhandenen, demontierbaren Montageplatten einzubauen.

Abbildung 2 zeigt das entwickelte Konzept zur Integration der MSW in die Glovebox. Das MSW-Oberteil steht auf einer Granit-Platte, welche in einer mit Sand teilgefüllten Wanne liegt. Diese Anordnung dient zur Dämpfung von Vibrationen und Schwingungen, die durch die Glovebox-Peripherie und Arbeiten an der Glovebox hervorgerufen werden. Durch eine kreisrunde Aussparung in der Granitplatte und der Wanne wird das MSW-Unterteil durch die Deckenplatte der Glovebox in deren Innenraum geführt. Ein Axialkompensator, der mit Flanschen an der Gloveboxdecke sowie im oberen Bereich des MSW-Unterteils verbunden ist, sorgt zusätzlich für den Ausgleich von Auslenkungen in vertikaler Richtung, welche bei der Bedienung der Messzelle resultieren. Der Doppelmantel (braun) am MSW-Unterteil dient zur Temperierung der temperatursensitiven Magnetkupplung. Axial und radial dichtende O-Ringe in den Flanschen des Axialkompensators und im Doppelmantel unterbinden den Gasaustausch zwischen Glovebox-Innenraum und Umgebung.

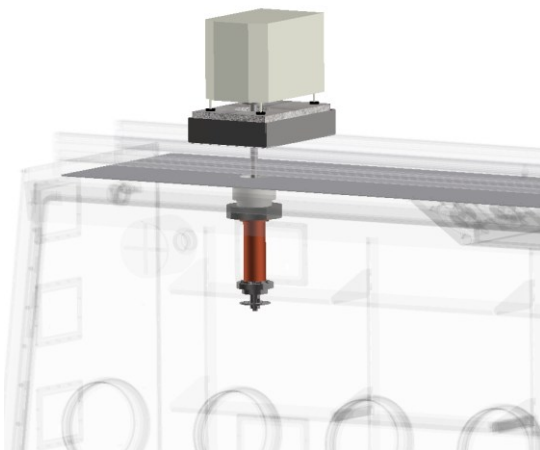


Abbildung 2: Einkopplung der Magnetschwebewaage in die Glovebox

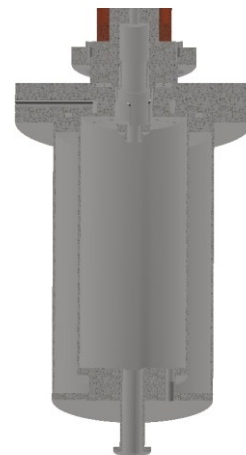


Abbildung 3: Messzelle mit Adapterflansch und Verteilerplatte

In Abbildung 3 ist das finale Konzept von Messzelle mit Adapterflansch und Verteilerplatte dargestellt. Die Messzelle wird über ihren Doppelmantel mittels Thermoöl temperiert. Am MSW-Unterteil, an dem sich die Aufhängung für die Probe befindet, ist ein Adapterflansch angebracht. Für den Trocknungsversuch wird die Messzelle mit dem Adapterflansch verbunden, sodass die Aufhängung in die Messzelle ragt. Das für die Trocknung benötigte Spülgas tritt über einen Einlass seitlich in den Adapterflansch ein und gelangt von dort in ein kreisrundes Plenum. Eine

Verteilerplatte unterhalb des Plenums sorgt mit kleinen Gasdüsen für eine über den Querschnitt homogenisierte Strömung am Einlass in die Messzelle. Die Fertigung der Bauteile (AP 2) wurde im Juni 2024 abgeschlossen.

Arbeitspaket 3: Montage und Aufbau

In AP 3 wurde von Februar bis März 2024 ein Testaufbau für die Prozessgasführung realisiert. Darauf basierend wurde eine geeignete Anordnung der Leitungen und Positionierung der darin befindlichen Mess- und Regelstellen entwickelt und optimiert. Im Mai konnte die detaillierte Planung der Rohrleitungen für die Prozessgase inklusive Schutzheizungen, Ventilen, Durchflussreglern sowie die zugehörige Messtechnik (Druck, Temperatur, Durchfluss) und Steuerungs- bzw. Regelungstechnik abgeschlossen werden. Die praktische Umsetzung erfolgte direkt im Anschluss und wurde im Juli 2024 erfolgreich beendet.

Parallel dazu wurde Laborinfrastruktur errichtet, um die benötigten technischen Gase für die Versuchsanlage bereitzustellen. Außerdem wurden die elektrische Versorgung und das Abgassystem der Anlage aufgebaut. Der Abgassammler der Glovebox und der Vakuumpumpe (Prozessgas aus Trocknungsversuch) wurden im Juni an das Abgassystem angeschlossen. Die Einkopplung der Magnetschwebewaage über das in AP 2 dargestellte Konzept erfolgte im August 2024. Parallel zum Aufbau der Anlage wurde das Programm (LabView) zur Automatisierung, Messdatenerfassung, Steuerung und Überwachung der Anlage implementiert. Damit wurde AP 3 abgeschlossen und Meilenstein 2 („Abschluss des Anlagenaufbaus - Systemkomponenten sind gefertigt und montiert, das Gesamtsystem inkl. Software-Integration ist aufgebaut“) erreicht.

Arbeitspaket 4: Inbetriebnahme der Systemkomponenten

AP 4 umfasste die Inbetriebnahme der Systemkomponenten und baut daher vollständig auf die vorangestellten Arbeitspakete auf. Die Inbetriebnahme der Glovebox fand im Mai 2024 statt. Mechanische, hardware- und softwareseitige Probleme auf Seiten des Herstellers, die den Betrieb der Glovebox teilweise beeinträchtigten, konnten durch Reparaturen und Nachbesserungen in den folgenden Monaten behoben werden, um so die erwartete Funktionalität der Glovebox zu erreichen werden. In der Zwischenzeit wurden die werkseitigen Montageplatten durch die speziell angepassten Montageplatten getauscht. Die Magnetschwebewaage wurde bereits vor der Integration in die Glovebox aufgebaut, in Betrieb genommen und getestet. Mit der Inbetriebnahme des FT-IR-Spektrometers im Rahmen einer Anwenderschulung wurde AP 4 im August 2024 beendet.



Abbildung 4: Gesamtansicht der Versuchsanlage. Glovebox mit eingekoppelter Magnetschwebewaage und links davon der Labortisch mit Arbeitsplatz und Anlagenperipherie.

Arbeitspaket 5: Kopplung Sorptions- und Spektroskopieeinheit

Die in AP 5 beschriebene Kopplung der gravimetrischen mit der spektrometrischen Messtechnik wurde mit dem Anschluss des Analysegasstroms aus der Messzelle der Magnetschwebewaage an das FT-IR-Spektrometer im August 2024 realisiert.

Abbildung 5 zeigt den Arbeitsplatz mit Messrechner, den Bedien- und Steuergeräten für Druck (Manometer) und Durchfluss (Durchflussregler „MFC“ und Durchflussmesser „MFM“) sowie Bedien- und Steuergerät für die Magnetschwebewaage. Das in AP 3 beschriebene LabView-Programm kommuniziert mit den Bedien- und Steuergeräten der Anlage, was bei der Durchführung von Trocknungs- und Sorptionsexperimenten eine zentrale Bedienung der dafür benötigten Instrumente ermöglicht. Die Bedienung der Glovebox erfolgt separat dazu über das herstellerseitig integrierte Panel.

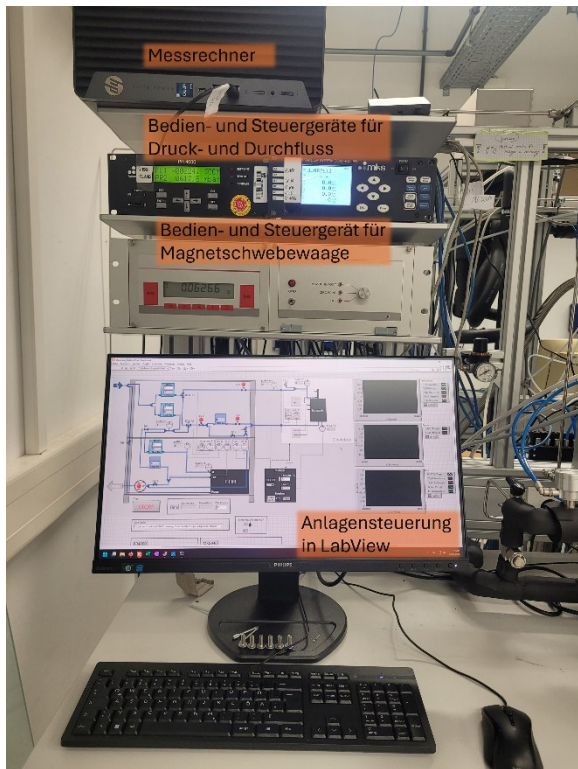


Abbildung 5: Arbeitsplatz der Anlage mit Messrechner sowie Bedien- und Steuergeräten. Der Bildschirm zeigt die graphische Benutzeroberfläche der in LabView implementierten Anlagensteuerung.

Eine detaillierte Darstellung der graphischen Benutzeroberfläche findet sich in Abbildung 6. Die Bedienelemente für die Regelgeräte, Ventile und die Vakuumpumpe sowie die Messwerte der Sensoren sind dort zusammen mit dem R&I-Fließbild dargestellt. Diagramme visualisieren Echtzeit-Verläufe von Durchfluss, Druck und Temperatur sowie Masse und Konzentrationen.

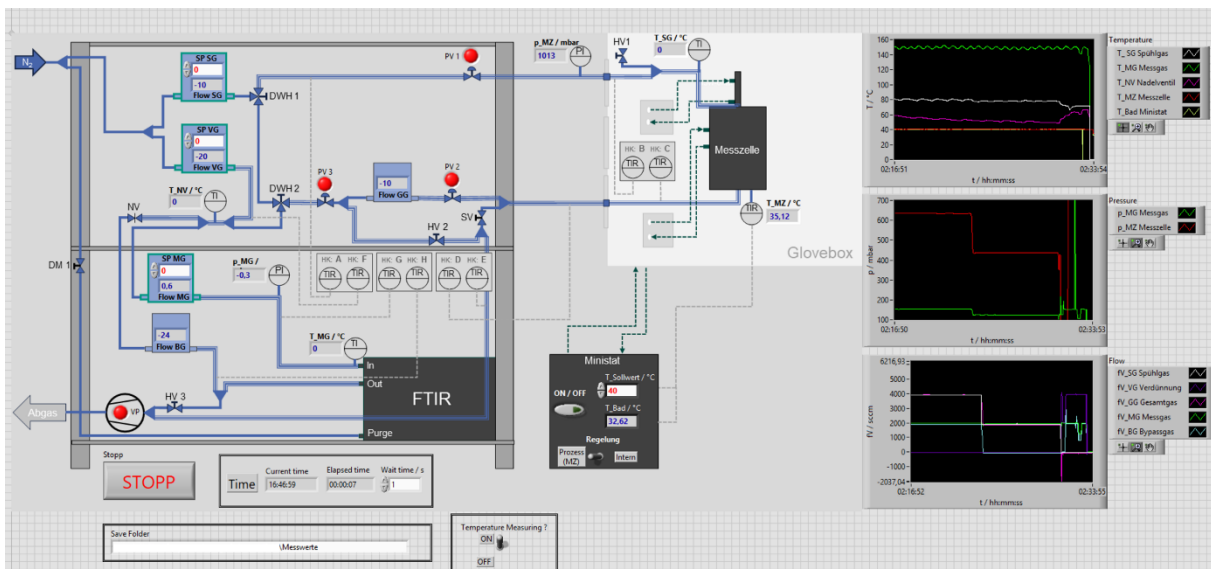


Abbildung 6: Graphische Benutzeroberfläche der Versuchsanlage mit Bedienelementen und Diagrammen für Echtzeit-Verläufen für Durchfluss, Druck und Temperatur.

Abbildung 7 zeigt die für Trocknungs- und Sorptionsexperimente in der MSW-Messzelle benötigte Anlagenperipherie außerhalb der Glovebox. Mit Durchflussreglern (MFC) wird der Normvolumenstrom des Spülgases (Stickstoff) und des Verdünnungsgases (Stickstoff) eingestellt. Als „Spülgas“ wird der Gasstrom bezeichnet, der die Messzelle während des Trocknungsversuches

durchströmt. Ein Manometer misst den Druck des Spülgases kurz vor Einlass in die Messzelle. Dabei nimmt das Spülgas Gase und Dämpfe auf und tritt aus der Messzelle als „Gesamtgas“ aus (vgl. Abbildung 9). Bei Bedarf kann dem Gesamtgas „Verdünnungsgas“ beigemischt werden, um die Konzentration der zu quantifizierenden Substanzen in den für das FT-IR-Spektrometer messbaren Bereich zu verschieben.

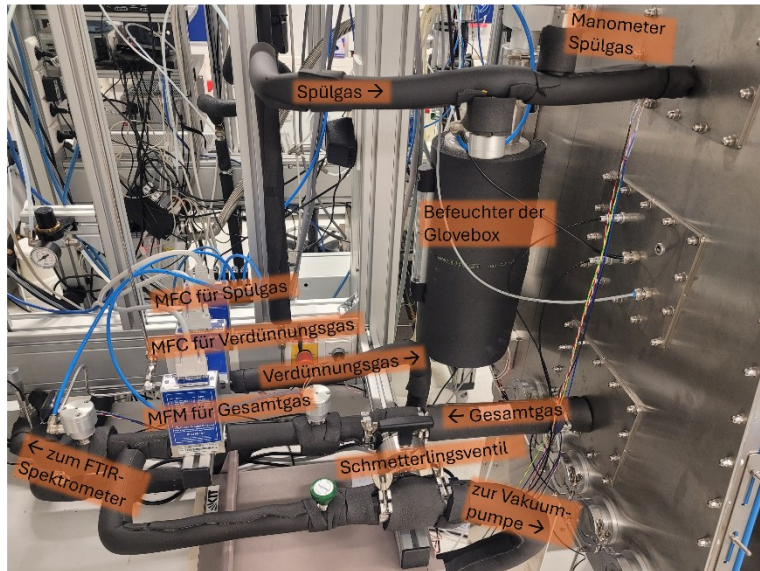


Abbildung 7: R&I-Peripherie außerhalb der Glovebox mit Durchflussreglern und -messern, Manometer und Ventilen.

Die realisierte Verschaltung von Durchflussreglern, Durchflussmessern (beide absperrbar) und Ventilen (Pneumatikventile, Handventile, Schmetterlingsventile) ermöglicht es dem Anwender, den Weg des Gesamtgasstroms von der Messzelle zur Vakuumpumpe je nach Anforderung an das Experiment zu steuern. Das Schmetterlingsventil dient dazu, den Gesamtgasstrom entweder auf direktem Wege zur Vakuumpumpe oder durch den Analyseabschnitt (bei Abbildung 10 genauer beschrieben) der Anlage, in dem sich das Spektrometer befindet, zu leiten. Ist lediglich eine Quantifizierung des Gesamtgases (nicht-komponentenaufgelöst) erforderlich, wird dieses zunächst durch einen Durchflussmesser (MFM) und dann weiter zur Vakuumpumpe geleitet. Sollen die Substanzen im Gasstrom zusätzlich komponentenaufgelöst quantifiziert werden, so wird das Gesamtgas teilweise oder vollständig in den Analyseabschnitt der Anlage eingeleitet.

Abbildung 8 zeigt die Montageplatte in der linken Wand der Glovebox. Durch diese werden die Leitungen für das Spülgas und das Gesamtgas in die Glovebox bzw. aus dieser herausgeführt. In einer weiteren Montageplatte befinden sich Kabelverschraubungen und -durchführungen für Kabel mit Steuersignalen und Messdaten.

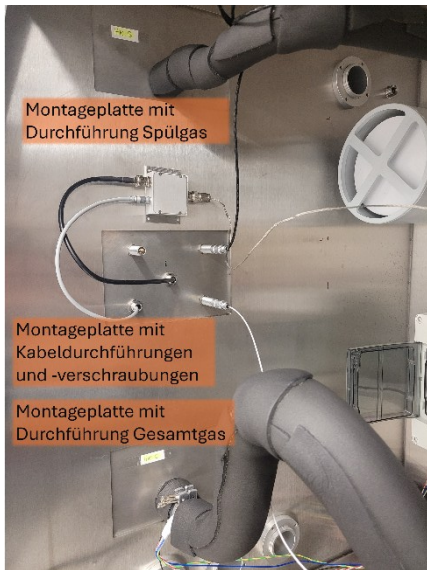


Abbildung 8: Montageplatten mit Rohrdurchführungen, Kabeldurchführungen und Kabelverschraubungen.

In Abbildung 9 ist der Kern der Anlage, die Messzelle der in die Glovebox eingekoppelten Magnetschwebewaage mit ihrer Peripherie zu sehen.

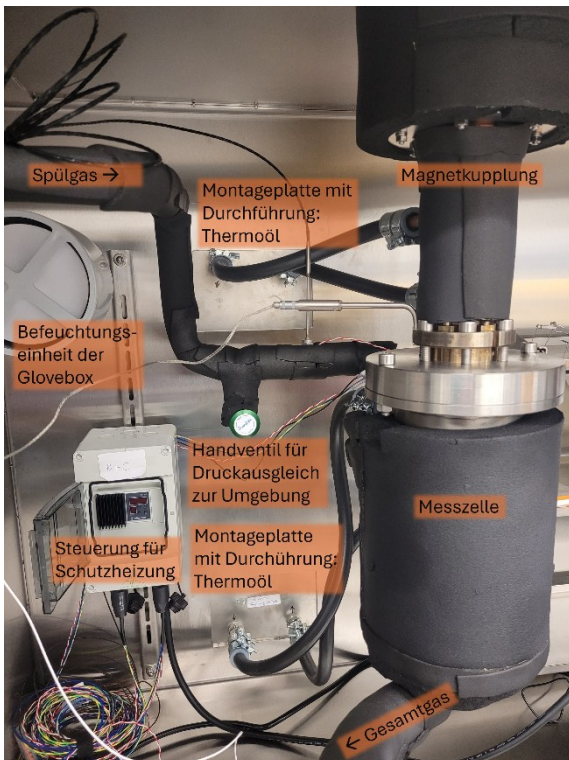


Abbildung 9: Messzelle und Magnetkupplung der in Glovebox eingekoppelten Magnetschwebewaage mit Peripherie. Die Befeuchtungseinheit (links) dient zur gezielten Einstellung von Taupunkten in der Gloveboxatmosphäre.

Durch Montageplatten in der Rückwand wird Thermoöl für die Temperierung von Magnetkupplung und Messzelle in die Glovebox und zurück zum Thermostaten geführt. Über ein Handventil vor dem Einlass in die Messzelle kann ein Druckausgleich zwischen Messzelle und umgebender Atmosphäre bewirkt werden. Dies ist notwendig, um die Messzelle nach einem Experiment im Unterdruck vom Adapterflansch lösen zu können. Die Heizungen an den Rohren für das einströmende Spülgas und das ausströmende Gesamtgas werden über eine Steuerung in der Glovebox bedient.

Das (verdünnte) Gesamtgas kann anschließend wieder in „Messgas“ und „Bypassgas“ aufgeteilt werden, um die maximal zulässige Durchflussmenge durch das FT-IR-Spektrometer zu berücksichtigen. Dazu ist dem Spektrometer ein Durchflussregler vorgeschaltet, mit dem der

Durchsatz an „Messgas“ eingestellt wird. Vor Eintritt ins Spektrometer erfassen ein Manometer den Druck und ein PT100 die Temperatur des Messgases. Das restliche Gas strömt durch einen Durchflussmesser und wird dem Messgas als „Bypassgas“ unmittelbar nach dem Spektrometer und vor der Vakuumpumpe wieder zugemischt.

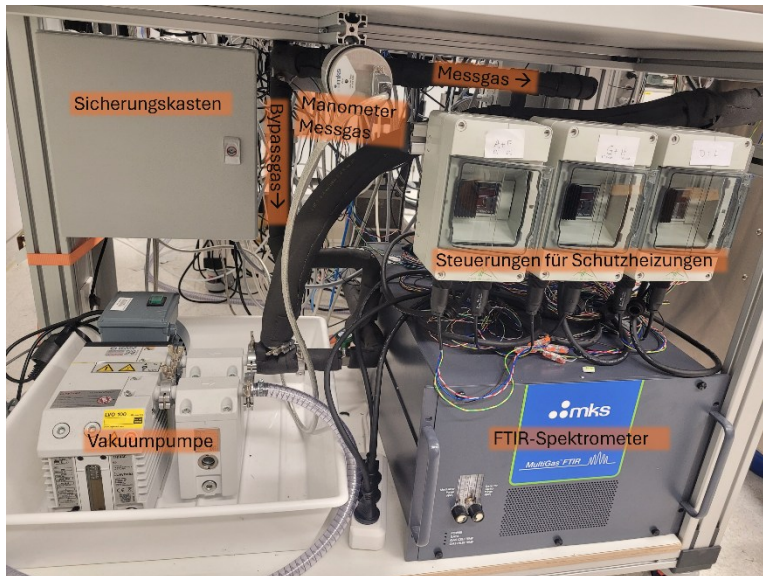


Abbildung 10: Rohrleitung für „Messgas“ zum FT-IR-Spektrometer und für „Bypass“ direkt zur Vakuumpumpe. Steuerungen für die Schutzheizungen aller beheizten Rohrleitungen außerhalb der Glovebox.

Die gasführenden Rohre sind weitestgehend isoliert und z.T. elektrisch beheizt, um die gewünschten bzw. erforderlichen Randbedingungen für die Trocknung und die spektrometrische Analyse einzustellen und Kondensation von Dämpfen in den Leitungen aufgrund von Wärmeverlusten zu verhindern. Widerstandsthermometer PT100 messen die Temperatur des Spülgases am Einlass in die Messzelle, des Gases im Messzelleninnenraum, des Gesamtgases sowie des Messgases unmittelbar vor dem Einlass in das Spektrometer. Manometer erfassen den Druck am Einlass der Messzelle und am Einlass des Spektrometers. Letztlich erlauben die im Analyseabschnitt gemessenen Konzentrationen und Durchflüsse zusammen mit Temperatur und Druck die Berechnung komponentenaufgelöster Stoffmengenströme.

Zur Demonstration der Funktionalität der Anlage sind in Abbildung 11 erste Messergebnisse gezeigt. Darin sind die zeitlichen Verläufe der Probenmasse und der Konzentration von Lösemittel im Messgas bei zwei verschiedenen Trocknungsrandbedingungen (eingestellt über Spülgasstrom und Druck in Messzelle) aufgetragen. Bei Versuch 1 wurden nur 50 % des Gesamtgases als Messgas durch das FT-IR-Spektrometer und der Rest in den Bypass geleitet. Bei Versuch 2 wurde der Spülgasstrom 50 % kleiner eingestellt als bei Versuch 1, wobei das Gesamtgas vollständig durch das FT-IR-Spektrometer geleitet wurde. Das Diagramm zeigt, dass die Verdunstungsrate (mg/s) erwartungsgemäß konstant ist, und bei Versuch 1 größer ist als bei Versuch 2. Das Spektrometer misst - wie erwartet - über die gesamte Messdauer eine konstante Konzentration des Lösemittels im Messgas. Die aus den spektrometrisch gemessenen Konzentrationen berechneten Stoffmengenströme an verdunstetem Lösemittel sind in guter Übereinstimmung mit den anhand der gravimetrischen Messung berechneten Stoffmengenströmen.

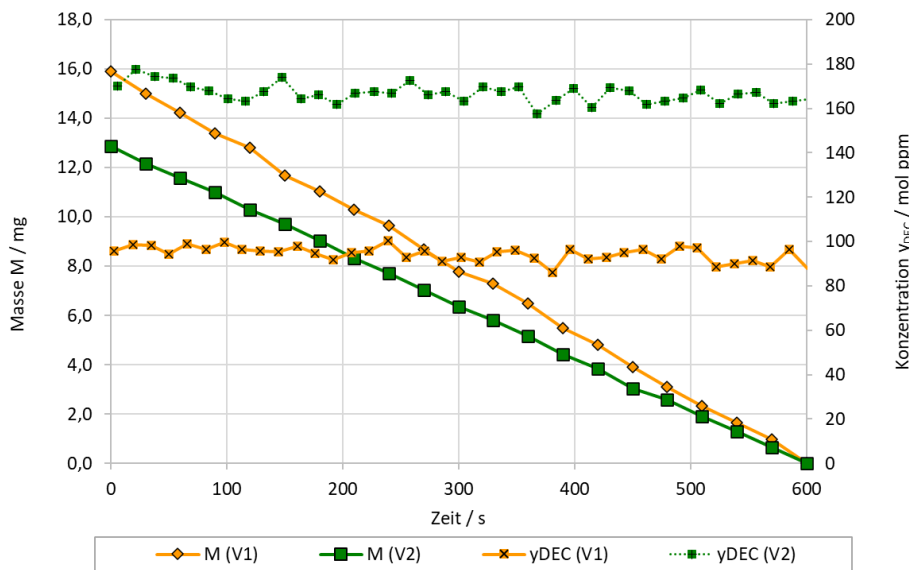


Abbildung 11: Verdunstung von Elektrolytlösemittel Diethylcarbonat (DEC) in der Messzelle bei zwei Spülgasströmen und Druckniveaus in der Messzelle (V1, V2). Auftragung der Messdaten der Magnetschwebewaage und des FT-IR-Spektrometers als zeitliche Verläufe der Massenabnahme und der Konzentration an DEC im Messgas.

I.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Im Investitionsprojekt nehmen die Glovebox, die Magnetschwebewaage und das FT-IR-Spektrometer die größten Positionen ein und vereinen etwa 2/3 der insgesamt genehmigten Projektmittel. Die restlichen Mittel wurden zur Fertigung individueller Bauteile sowie Beschaffung der Apparate und Geräten, von Mess- und Regelungstechnik in der Anlagenperipherie aufgewendet.

I.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Eine nachhaltige Kreislaufwirtschaft für Batterien erfordert ressourcenschonende und effektive Produktions- und Recyclingverfahren. Die Forschung im Bereich der Verfahrens- und Prozesstechnik auf dem Gebiet der Elektrodenproduktion und der thermischen Vorbehandlung beim Recycling von End-of-Life-Zellen ist dabei unerlässlich, um bestehende Prozesse zu optimieren und technologische Fortschritte zu erzielen. Der in diesem Investitionsprojekt etablierte, neuartige Versuchsaufbau ermöglicht einzigartige Untersuchungen der Trocknungs- und Sorptionskinetik von sensiblen/toxischen Materialsystemen, die mit den vorhandenen Laboranlagen nicht durchführbar sind und eröffnet damit langfristig Forschungsmöglichkeiten im Bereich der Batterietechnologie

I.4 Voraussichtliche Nutzung, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplan

Wirtschaftliche Verwertbarkeit

Die Versuchsanlage ermöglicht durch die hohe Flexibilität und die Möglichkeit, industrielle Prozesse und Prozeduren im Labormaßstab nachzustellen, unmittelbar umfangreiche experimentelle Untersuchungen. Durch den modularen Aufbau können Anpassungen kurzfristig innerhalb weniger Monate und mit geringem Aufwand vorgenommen werden, sodass die Anlage agil an neue Fragestellungen angepasst werden kann. Die erworbenen Erkenntnisse sollen mittelfristig innerhalb von ein bis zwei Jahren nach Inbetriebnahme der Anlage in die Elektrodenproduktion und den

Recyclingprozess einfließen und zu einer Erhöhung der Recyclingquote sowie zu einer Erhöhung der Durchsatzgeschwindigkeit und Senkung der Produktionskosten bei gleichbleibender Elektrodenqualität in der Elektrodenproduktion führen. Diese Basis kann rasche Entwicklungen von Anlagentechnologien zur Herstellung von Batteriezellen sowie zur Rückgewinnung der Elektrodenausgangsmaterialien zur Folge haben. Es ist davon auszugehen, dass die Versuchsanlage langfristig (ca. 10 Jahre) für eine Vielzahl weiterer Industrie- und Forschungsprojekte genutzt wird. Dies eröffnet Potenziale für Kooperationen, Drittmittelfinanzierung und die wirtschaftliche Verwertung der gewonnenen Erkenntnisse, sei es durch direkte industrielle Anwendungen, Patente oder Technologietransfer. Die Anlage stellt eine nachhaltige Investition dar, die zur Innovationsförderung beiträgt. Die an der Anlage arbeitenden Doktorandinnen und Doktoranden sind bedeutende Kompetenzträger für die Industrie.

Wissenschaftliche und technische Verwertbarkeit

Die Versuchsanlage ermöglicht die Beantwortung zentraler wissenschaftlicher Fragestellungen im Bereich der Elektrodenproduktion und des Recyclings von End-of-Life Zellen und trägt damit zur Ergründung und Publikation von neuem Wissen bei. Die grundlegenden Erkenntnisse bei der Erforschung von Lithium-Ionen-Batterien können kurzfristig (innerhalb der ersten 6 Monate) in auf artverwandte Speichertechnologien übertragen werden, um z. B. Herstellungs- und Recyclingverfahren für Batterien mit Lithium-Schwefel-Kathoden, siliziumbasierte Anoden, Post-Li-Systeme und für All-Solid-State-Batterie zu adressieren. Für die Arbeitsgruppe entsteht somit mittelfristig (in den nächsten 1-2 Jahren) und langfristig (ca. 10 Jahre) eine hohe Aussicht auf die Akquise neuer Forschungsvorhaben. Das Projekt erweitert die Kompetenzen der TFT im Bereich der Trocknungstechnik, zudem findet ein Wissenstransfer im universitären Umfeld an die nächste Generation von Ingenieurinnen und Ingenieuren statt.

I.5 Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Im Verlauf des Projektes wurde kein Fortschritt auf dem Gebiet bei anderen Stellen bekannt.

I.6 Erfolgte und geplante Veröffentlichung der Ergebnisse

Zeitschriftenartikel

L. Lödige, J. Dörr, P. Scharfer, W. Schabel (2025): „Unique Experimental Setup for Advanced Investigations on Drying in Battery Production and Recycling“ **(in progress)**