

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

## ReCycle – Abschlussbericht 2023\_ULT AG

„Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.“

Automatisierung als Schlüsseltechnologie zur wirtschaftlichen Wiederaufbereitung von Lithium-Ionen-Batterie-Systemen

### **Projekt-Abschlussbericht**

### **Automatisierung als Schlüsseltechnologie zur wirtschaftlichen Wiederaufbereitung von Lithium-Ionen-Batterie-Systemen**

#### **Teilprojekt:**

**"Entwicklung von Erfassungs- und Filtrationslösungen beim Recycling von Lithium-Ionen-Batterie-Systemen"**

Zuwendungsgeber:	Bundesministerium für Bildung und Forschung
Förderkennzeichen:	03ETE031D
Projektaufzeit:	01.01.2021-30.06.2023
Berichtslaufzeit:	01.07.2022-30.06.2023

Berichtspflichtiger: **ULT AG**

Projektleitung: **Dipl.-Ing. (FH) Tom Rätze; Dipl.-Ing. Madeleine Berger**

## **Teil I: Kurze Darstellung**

### **1 Aufgabenstellung**

Im Vorhaben „ReCycle“ fanden sich insgesamt 13 Partner zusammen, um Technologien entlang der Wertschöpfungskette der Wiederaufbereitung von Lithium-Ionen-Batterien und Supercap-Speicher zu erforschen. Gezielt wurden alle Abschnitte – von der Rücknahme, der Tiefentladung, der Demontage, der Zerkleinerung, der Fraktionierung bis zur Wiedergewinnung relevanter Rohstoffe – im Konsortium betrachtet. Ein starker Fokus lag auf der Konzepterstellung für Prozesse und Anlagen und auf dem Nachweis der Machbarkeit im kleintechnischen Maßstab.

#### Zielstellung des ULT AG

Das Recycling gealterter oder defekter Li-Ionen-Batterien und Ultrakondensatoren (Systeme und Zellen) ist eine wesentliche Rohstoffquelle für die Fertigung der Batterien von Morgen. Eine Zerlegung der Batterie-Systeme und Zellen in Einzelbestandteile ist erforderlich, um effizient und sortenrein an die enthaltenen Rohstoffe zu gelangen. Als Hersteller von Absaug- und Filtertechnik war es Ziel der ULT AG entsprechende Konzepte für die Erfassung, Abscheidung und Rückgewinnung von vorrangig partikelförmigen Wertstoffen für nachhaltige Rohstoffkreisläufe zu entwickeln, zu erfordern und zu realisieren. Voraussetzung war die Ermittlung der Emissionen, welche bei den unterschiedlichen Aufbereitungsschritten frei werden. Diese Zielstellung wurde unter den Aspekten der Betrachtung der gesamten relevanten Prozessketten sowie Arbeitssicherheit und Umweltschutz bearbeitet.

### **2 Voraussetzungen, unter denen das Projekt durchgeführt wurde**

Elektromobilität biete die große Chance zukünftig in verschiedenen Branchen individuelle, umweltschonende, CO<sub>2</sub>-neutrale Produkte herzustellen. Dafür sind jedoch Ressourcen notwendig, welche zum Teil national nicht in ausreichender Menge verfügbar sind oder nur unter schwierigen Bedingungen zu gewinnen werden können. Daher muss im Rahmen einer Cradle-to-Grave-Betrachtung schon frühzeitig die max. Rückgewinnung von Rohstoffen aus den End-Of-Life Batterien erfolgen. Nur damit lässt sich wirklich eine klimafreundliche Fortbewegung realisieren.

Das Vorhaben adressiert im Kern vollständig die Schwerpunktsetzung des 7. Energieforschungsprogramm „Innovationen für die Energiewende“ zu Punkt 3.2.13 Entsorgung, Reststoff- und Abfallbehandlung, zirkuläres Wirtschaften. Lösungen für die Weiternutzung von energieintensiven Wertstoffen und die energieeffiziente Gestaltung der Verarbeitung von Reststoff- und Abfallströmen.

Das interdisziplinäre Konsortium umfasst eine strategische Allianz für Forschung, Innovation und Wachstum im Bereich des Batteriezellrecyclings. Gemeinsames Ziel ist es, Deutschland die Technologieführerschaft in den zentralen Bereichen der Batterieherstellung sowie nahezu vollständigen Nutzung der ursprünglichen Ausgangsrohstoffe zu sichern.

### **3 Planung und Ablauf des Vorhabens**

Das Projekt Recycle wurde zur Erreichung der Projektziele in mehrere Module gegliedert:

*Arbeitspaket 0: Recyclingkonzept*

*Arbeitspaket 1: Anforderungsanalyse, Konzepterstellung und Auswahl geeigneter Prüflinge*

*Arbeitspaket 2: Diagnose & Klassifikation des Batteriezustandes*

*Arbeitspaket 3: Demontage zu Untereinheiten*

*Arbeitspaket 4: Zerkelinerung und Verbundaufschluss*

*Arbeitspaket 5: Trennung der Komponenten*

*Arbeitspaket 6: Stoffliches Recycling der Aktivmaterialien*

Die Arbeiten der ULT AG fanden dabei im AP 0, AP 4, AP 5 und AP 6 statt.

### **4 Stand der Wissenschaft und Technik vor Projektbeginn**

Unternehmensschwerpunkt der ULT AG ist die Entwicklung und Herstellung von Anlagen zur Absaugung und Reinigung von Prozessgasen in industriellen Anlagen. Ziel ist es, die Gesundheit der Mitarbeiter, die Prozess- und Produktqualität, sowie die Umwelt zu schützen, indem die freigesetzten Emissionen aus Prozessgasen entfernt werden.

Dazu werden dem Stand der Technik entsprechend Abreinigungsfilter, Speicherfilter sowie Adsorptionsfilter eingesetzt.

Die Aufbereitung von Batterien, bzw. die Bewertung, Erfassung und Abscheidung der freiwerdenden Stoffe sind auf Grund der neunen Herstellverfahren (Anoden- und Kathodenmaterial, Durchleiter auf Basis von PAFS, etc.) sowie der Vielzahl von Batterietypen eine Herausforderung, für welche die Grundlagen für die Entwicklung von speziell für diesen Anwendungsfall im Rahmen dieses Projektes geleistet wurde. Insbesondere die Erstellung der Anforderungsprofile der einzelnen Partner (und Verfahren), sowie die systematische Ermittlung der Emissionen an unterschiedlichen Aufbereitungsverfahren, boten die Grundlage für Konzeptentwicklung, Weiterentwicklung und Demonstration erste Versuchsmuster.

### **5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen**

Im Projekt erfolgte eine enge Zusammenarbeit mit allen Partnern. Insbesondere mit den Firmen Agro Drisa, SiC Recycling, ImpulsTec, dem Fraunhofer IWS sowie dem Unterauftragnehmer Institut für Luft- und Kältetechnik (Dresden). Der Austausch von Erfahrungen, Wissen und Lösungsansätzen waren stets gegeben. Das Konsortium bündelte das unternehmensübergreifende Wissen und wird es Rahmen der eigenen Netzwerke nutzen, um anschließend die Ergebnisse des Vorhabens in Form von Anlagen und Modulen am Markt etablieren.

Der Verbundkoordinator Thyssenkrupp Systemengineering GmbH sorgte stets für eine umfassende Kommunikation und bündelte die Ergebnisse der einzelnen Partner.

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

## ReCycle – Abschlussbericht 2023\_ULT AG

„Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.“

Automatisierung als Schlüsseltechnologie zur wirtschaftlichen Wiederaufbereitung von Lithium-Ionen-Batterie-Systemen

### **Projekt-Abschlussbericht**

### **Automatisierung als Schlüsseltechnologie zur wirtschaftlichen Wiederaufbereitung von Lithium-Ionen-Batterie-Systemen**

#### **Teilprojekt:**

**"Entwicklung von Erfassungs- und Filtrationslösungen beim Recycling von Lithium-Ionen-Batterie-Systemen"**

Zuwendungsgeber:	Bundesministerium für Bildung und Forschung
Förderkennzeichen:	03ETE031D
Projektaufzeit:	01.01.2021-30.06.2023
Berichtslaufzeit:	01.07.2022-30.06.2023

Berichtspflichtiger: **ULT AG**

Projektleitung: **Dipl.-Ing. (FH) Tom Rätze; Dipl.-Ing. Madeleine Berger**

## Teil II: Eingehende Darstellung

### 1. Verwendung der Zuwendung und der erzielten Ergebnisse, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

Das Forschungsvorhaben Recycle konzentrierte Analyse und Bewertung der bei den Einzelschritten freiwerdenden Emissionen sowie die Konzeption, Konstruktion und Realisierung einer entsprechenden Erfassungs- und Abscheidetechnologie. Schwerpunkt ist die Ermittlung eines technisch und wirtschaftlich geeigneten Adsorptionsmediums sowie dessen Implementierung in eine hocheffektive und wirtschaftliche Abscheidetechnologie. Des Weiteren wird untersucht, inwieweit erfassbare Stoffe aus dem Abscheidesystem zurückgewonnen werden können. Konkrete Zielstellungen der ULT AG waren dabei unter anderem:

Definierten Ziele	Erreichte Ziele
Ermittlung der Anforderungen an Prozessumgebungen für mechanische Prozesse wie Shreddern, Sortieren und Sieben.	Im AP 0 konnten die Anforderungen zu den jeweiligen Prozessumgebungen über erstellte und entsprechend ausgefüllte Checklisten erfolgreich ermittelt werden.
Messung und Analyse der beim Zerkleinerungsprozess freiwerdenden Schadgase ( $> 5\text{ ppm}$ ) und Partikel ( $0,2\ldots 40\mu\text{m}$ )	Die Messungen konnten in mehreren Messkampagnen, bei unterschiedlichen Projektpartnern durchgeführt werden und die Ergebnisse bilden die Grundlage für Konzeption und Entwicklung entsprechender Abscheidetechnologie.
Entwicklung von Konzepten und Konstruktionen für eine anwendungsspezifische Absaug- und Filtereinheit	Die Entwicklung von Konzepten und Konstruktionen konnte erfolgreich durchgeführt werden.
Konzeptevaluierung zur Abtrennung und Rückgewinnung der Lösemittelbestandteile im Elektrolyten	Es wurden sowohl für die Probenahme als auch für die perspektive Umsetzung Konzepte entwickelt, eine abschließende Evaluierung wird anschließend weitergeführt.
Definierte Sicherheitsaspekte der mechanischen Aufbereitung (Schadstoffemission, Explosionsschutz) und konzipierte Sicherheitssysteme für den Aufbereitungsverfahren	Es erfolgten Messungen und Bewertungen zum Arbeits- und Explosionsschutz. Für die Siebanlage beim Projektpartner SiC Recycling wurde ein Vorlagendokument für Explosionsschutz nach § 6 Abs. 9 GefStoffV erstellt.

Die erzielten Ergebnisse der entsprechend Arbeitsplan durchgeführten Forschungstätigkeiten sind im Folgenden zusammenfassend erläutert.

#### **Ergebnisse AP 0**

Im AP 0 erfolgten der Recherche und Erstellung Anforderungsprofile der jeweiligen Prozessumgebungen. Dazu wurde der Stand der Technik für Abscheidetechnologien und für die Erfassung der Emissionen direkt an der Entstehungsstelle analysiert.

Der Wirkungsgrad von Absaug- und Filtertechnologie steht und fällt mit der Qualität der Schadstofferfassung. Vor allem ist größte Nähe zur Schadstoffquelle entscheidend: Beispielsweise bedeutet eine Verdopplung des Abstandes eine Vervierfachung der aufzubringenden Saugleistung und exponentiell steigenden Energieaufwand, um die entsprechende Menge an Partikeln zu erfassen. Deshalb sind Absaug- und Erfassungselemente erforderlich, die sich flexibel an die Gegebenheiten realer Arbeitsplätze anpassen und die einfach zu installieren sind.

Die Abscheidung (Adsorption) gas- und dampfförmiger Luftverunreinigungen erfolgt am Aktivkohlefilter bzw. Chemisorptionsfilter, welche je nach abzuscheidendem Stoff speziell ausgewählt wird. Die Filterwirkung der Aktivkohle beruht auf der Adsorption, das heißt der Anlagerung von (auszufilternden) Substanzen auf der Oberfläche der Aktivkohle. Für die Aufbereitung der Batteriezellen werden die erwarteten Emissionen im weiteren Projektverlauf kontinuierlich zusammengestellt und die optimalen Sorptionsmittel gemeinsam mit dem Projektpartner IWS ausgewählt und erprobt.

Insbesondere beim Umgang mit toxischen Stäuben oder KMR-Stoffen (krebszeugende bzw. karzinogene, keimzellmutagene (erbgutverändernde) und reproduktionstoxische (fortpflanzungsgefährdende) wie sie auch beim Recyceln von Batteriezellen auftreten können, kann die Kapselung bzw. Umhausung der Emissionsquelle den optimalen Schutz der Mitarbeiter darstellen.

Neben den Herausforderungen der Batteriezellenproduktion, welche einen hohen Anspruch an die Fertigungsumgebungen wie Sauberkeit und Luftfeuchtigkeit haben, müssen auch beim Recycling der Zellen nach Lebensende entsprechende Maßnahmen zum Schutz von schädlichen Einflüssen gas- und partikelförmiger Emissionen getroffen werden.

Im Rahmen der Recherchen in AP 0 wurden die einzelnen Prozessschritte ermittelt und die erforderlichen Bedingungen abgeleitet.

Der Prozess des Batterierecyclings ist abhängig von der Zusammensetzung der Zellen und der jeweiligen Aufbereitung. Entsprechend resultiert auch die Freisetzung von Schadstoffen und Maßnahmen zu deren Eliminierung. Es wurden Checklisten (siehe Abbildung 1) erstellt und den Projektpartnern zur Ermittlung der relevanten Parameter zur Verfügung gestellt mit welchen die Quellen der Freisetzung und bekannten Emissionen ermittelt werden.

- Gasförmige Emissionen (Wasserstoff, Acetonitril, Dimethylsulfoxid, Ethylencarbon, Propylenkarbonat, Dimethylcarbonat, Diethylcarbonat, Ethylmethylcarbonat)
- Staubförmige Emissionen (Schwarzmasse, Al, Cu, Kunststoff)

Beispielhaft ist die Checkliste der Anforderungsparameter des Partners SiC Recycling für die Siebmaschine in der folgenden dargestellt.

Projektpartner: <b><u>SiC Processing (Deutschland) GmbH</u></b>		Adresse: Neuteichnitzer Str. 46, 02625 Bautzen
		Tel.: +49 3591 5293585 E-Mail: vladislav.ischenko@sic-processing.de
Projekt: Recycle		
Datum: 17.03.2021	ULT Betreuer: Madeleine Berger	
<b>Bezug zu Arbeitspaket</b> (wenn erforderlich für jedes AP/UAP gesondertes Formular ausfüllen): ...		<b>Finale Produkte:</b> Schwarzmasse, Al, Cu, Kunststoff
<b>Material: Werkstoffe des Bearbeitungsprozesses</b> Sortierung Schwarzmasse von Folien		
<b>Gaseigenschaften</b> (wenn zutreffend und bekannt, alternativ bitte Sicherheitsdatenblätter übergeben): <input type="checkbox"/> Explosionsfähig <input type="checkbox"/> Kanzerogen		
<b>Staubeigenschaften</b> (wenn zutreffend und bekannt, alternativ bitte Sicherheitsdatenblätter übergeben): <input type="checkbox"/> Explosionsfähig <input type="checkbox"/> Brennbar <input checked="" type="checkbox"/> Trocken <input type="checkbox"/> Klebrig <input type="checkbox"/> Ölig <input checked="" type="checkbox"/> Toxisch		
<b>Material: Hilfsstoffe und Hilfgase des Bearbeitungsprozesses</b> (Sicherheitsdatenblatt, wenn vorhanden anfügen) ...		
<b>Bearbeitungsstationen:</b> <input checked="" type="checkbox"/> Einzelmaschinen <input type="checkbox"/> Bearbeitungszentren <input type="checkbox"/> Sonstiges: ...	<b>Bearbeitungsschritt:</b> <input checked="" type="checkbox"/> Entnahme und Transport <input type="checkbox"/> Deaktivierung und Entladung <input type="checkbox"/> Demontage <input type="checkbox"/> Zerkleinern	<input checked="" type="checkbox"/> Sortieren, Sieben <input type="checkbox"/> Hydrometallurgische Prozesse <input type="checkbox"/> Trennen von Komponenten <input type="checkbox"/> Sonstiges: ...
<b>Name und Bezeichnung der Bearbeitungsmaschine:</b> Siebmaschine ...	<b>Anzahl der abzusaugenden Maschinen/Arbeitsplätze:</b> ...	
<b>Angestrebte Betriebsstunden:</b> <input checked="" type="checkbox"/> 5 Stunden pro Tag <input type="checkbox"/> ..... Stunden pro Jahr	<b>Angestrebter Durchsatz:</b> <input checked="" type="checkbox"/> bis 500 kg pro Stunde	<b>Sonstige Angaben:</b> Test zum max. Durchsatz angedacht
<b>Gewünschte Bearbeitungsmaschinenkapselung und -luftführung:</b> <input checked="" type="checkbox"/> ohne Umhausung <input type="checkbox"/> Umluftbetrieb <input checked="" type="checkbox"/> Abluftbetrieb		
<b>Mobilität:</b> <input checked="" type="checkbox"/> Mobile Nutzung		<input type="checkbox"/> Repositionierung zwischen Nutzungen <input type="checkbox"/> Stationär
<b>Konnektivität:</b> <input type="checkbox"/> Koppelung mit Maschine	<input checked="" type="checkbox"/> Zentrale Steuerung	<input type="checkbox"/> Sonstiges: ...
<b>Erforderliche Prozessumgebungseigenschaften</b>		
<input checked="" type="checkbox"/> Luft <input type="checkbox"/> rel. Feuchte (%):...	<input type="checkbox"/> Inertgas: ... <input type="checkbox"/> Überdruck (Pa): ...	<input checked="" type="checkbox"/> Platzbedarf: ... <input type="checkbox"/> Sonstiges: ...
<b>Aufstellbedingungen</b>		
<input checked="" type="checkbox"/> Umgebungstemperatur: bis 35°C <input type="checkbox"/> rel. Feuchte der Umgebung (%):...	<input type="checkbox"/> ATEX ja: (Zone) ... <input type="checkbox"/> Außen	
<b>Kommentar</b> Für eine umfassende Ermittlung des Anforderungsprofiles der Prozessumgebungen sind Skizzen, Fotos und alle weiteren Informationen sehr hilfreich. Dazu zählen insbesondere die Abmaße und die Konstruktion der Arbeitsplätze und Bearbeitungsmaschinen.		

ULT AG, Am Göpelteich 1, 02708 Löbau, Deutschland  
Telefon +49 (0) 3585 4128-401, Telefax +49 (0) 3585 4128-11, [www.ult.de](http://www.ult.de), [madeleine.berger@ult.de](mailto:madeleine.berger@ult.de)

Abbildung 1: Checkliste Anforderungsprofile

## Ergebnisse AP 4/ 5

### AP4 – Konzept der Erfassung und Handhabung freiwerdender Emissionen

Planmäßig erfolgten im AP VI begleitende Analyse der Recyclingschritte für Akkumulatoren und Kondensatoren. Dazu erfolgten Vor-Ort Besichtigungen den Partnern SiC Processing, Liofit und Implustec. Es wurden die jeweiligen Prozessschritte untersucht und bewertet. Derzeit wird die Probennahmen und Analyse der chemischen Elemente und Zusammensetzungen (gas- und partikelförmig) geplant sowie eine Datenbank hinsichtlich gesundheitlicher und explosionsgefährdenden Eigenschaften gemeinsam mit dem Projektpartner IWS erarbeitet. (Abbildung)

Eingabewerte	Berechnungswerte	Ausgabewerte	
	Reiner Stoff		
CAS-Nummer	105-58-8		Lade Stoffdaten
Name	Diethylcarbonat		
Aggregatzustand	flüssig		
Verbrauchsmenge	15	[ml/h]	
	15	[g/h]	
	0,01	[g/m³]	
Konzentration Rohgas	3	[ppm bzw. ml/m³]	
	0,00	[Vol.-%]	
Medium	Luft		
Volumenstrom	1200	[m³/h]	
Arbeitstemperatur	25	[°C]	
rel.-Feuchte	45	[%]	Berechne Konzentration
Sättigungsdampfdruck	31,6	[hPa]	
Partialdruck	14,2	[hPa]	Feuchte und Taupunkt
absolute Feuchte	10,3	[g/m³]	
Taupunkt	12,2	[°C]	
<b>Prozessbetrachtung</b>			
Reproduktionstoxizität		R	
Mutagenität		M	Prüfe KMR
Kanzerogenität		C	
Prozess	Umluft möglich		
<b>Explosionsschutzbetrachtung</b>			
UEG Reiner Stoff	1,1	[Vol.-%]	
Prozent der UEG	0,02	[%]	Explosionschutzberachtung
Empfehlung	Kein EX-Gerät erforderlich		
<b>Standzeitbetrachtung</b>			
Sorptionsmittel	A		Sorptionsmittel
Aufnahmekapazität A-Kohle	15	[Ma.-%]	
Aufnahmekapazität Purafil	0	[Ma.-%]	
Menge an Sorptionsmittel	AK 30kg		
Menge an Aktivkohle	30	[kg]	
Menge an Purafil	0	[kg]	
Standzeit AK	309	[h]	
Standzeit PS	0	[h]	
Korrosion / Säure			Löschen

Abbildung 2: Datenbank zu Beurteilung freiwerdender flüchtiger Stoffe

Während des Projektes erfolgte die kontinuierliche Bearbeitung der Stoffdatenbank vor allem in Hinblick auf die Bewertung der Emissionen hinsichtlich kanzerogenen, mutagenen und reproduktionsrelevanten Gefahrstoffen sowie den explosionstechnischen Aspekten.

Im AP 5 erfolgten sehr enge Abstimmung mit Projektpartner SiC Processing/Recycling über den Prozess der Entschichtung und mechanische Aufbereitung der Elektroden.

Es erfolgten die Erstellung erster Konzepte für die Erfassung und Abscheidung von Gasen und Partikeln, Für die Erfassung von Partikelproben wurde ein Abscheider installiert

Es erfolgten Abstimmung der Projektpartner über Raumbedarf (Kapselung) und Prozessbedingungen sowie die Erstellung einer umfangreichen Versuchsplanung.

Prozess	Nr.	Messtelle [Beschreibung]	Messzeit [Minuten]	Messobjekt	Messmittel	Vorbereitung	Fraunhofer IWS Unterauftrag ILK Dresden	Auswertung
Trockenaufbereitung, Zerkleinerung	2.1/1- 2.1/3	Hammermühle	3 x 30	Partikel (physikalisch und chemische Zusammensetzung)	Grimm, SMPS, Aerosolspektrometer TOPAS	Für SMPS: Transportgenehmigung mind. 2 Wochen vorab	Partikelgrößenverteilung	Online, Gravimetrisch, Chemielabor (ILK)
Ist-Stand- Skeleton		(Messpunkt oben neben Aufgabe)			VC-25 EDX	Papiere	E-Staub, A-Staub	
					REM	Probennahmegeräß, Pumpe mit Glasfaserfilter, REM- Klebefpad	Staubinhaltstoffe (Al, C,Ni, Cr, Co, Cu, Fe, Mn, V)	Mikroskop, REM, ggf. TEM
	2.2/1- 2.2/3	Hammermühle	3 x 30	Partikel (physikalisch und chemische Zusammensetzung)	Grimm, SMPS	Für SMPS: Transportgenehmigung mind. 2 Wochen vorab	Partikelgrößenverteilung, A-Staub, E-Staub	Online, Gravimetrisch, Chemielabor (ILK)
		(Messpunkt unten neben Bigbag)			VC-25 EDX	Papiere Klebefpads, Probennahmegeräß	E-Staub, A-Staub Staubinhaltstoffe (Al, C,Ni, Cr, Co, Cu, Fe, Mn, V)	
					REM, ggf. TEM		Partikelform (Fasern?)	Mikroskop, REM, ggf. TEM
	2.3/1	Hammermühle_Rohgasleitung - 100 %		Prozessparameter (Geschwindigkeit und st. Druck)	Prandtl-Rohr, Anemometer, Duckmesskoffer	Messrohr (ULT); 1500 mm; DN 130, 2 x Messsutzen 3/4" IG, -90° versetzt		
	2.3/2	Hammermühle_Rohgasleitung - 50 %		ggf. Rohgasstaubgehalt (gravimetrische Staubprobennahme)	Planfilterkopf	Papiere	Staubinhaltstoffe (Al, C,Ni, Cr, Co, Cu, Fe, Mn, V)	
	2.3/3	Hammermühle_Rohgasleitung - X %			Planfilterkopf			
	2.4/1	Hammermühle_Reingasleitung - 50 %		Reingasstaubgehalt (gravimetrische Staubprobennahme)	Planfilterkopf	Papiere	Staubinhaltstoffe (Al, C,Ni, Cr, Co, Cu, Fe, Mn, V)	
	2.4/2	Hammermühle_Reingasleitung - 50 %		Reingasstaubgehalt (gravimetrische Staubprobennahme)	Planfilterkopf	Papiere	Staubinhaltstoffe (Al, C,Ni, Cr, Co, Cu, Fe, Mn, V)	
		Bemerkung: Reingas nach zentr. Entstauber		Derzeit keine Reingasleitung vorhanden				
	2.5	Hammermühle_Abklatschproben		Fasern, Partikelmorphologie		Klebestreifen, Klebefpads		Mikroskop, TEM, REM

Abbildung 3: Versuchsplanung erste Messkampagne SiC -Hammermühle

Diese beinhaltet auch die Stoffanalysen gemeinsam mit dem Unterauftragnehmer ILK Dresden. Folgende Messungen wurden durchgeführt:

- Hammermühle und Scheidmühle jeweils:

Prozesstechnische Rahmenparameter (Temperatur, Feuchte, Druck, Geschwindigkeit)

Staubinhaltstoffe in Abluft und am Arbeitsplatz (Al, Ni, C, Cr, Co, Fe, Mn, V)

Partikelgrößenverteilung (SMPS) und Partikelform (EDX, REM)



Abbildung 4: Messstellen Scheid- und Hammermühle

Des Weiteren erfolgte die kontinuierliche Bearbeitung der Stoffdatenbank vor allem in Hinblick auf die Bewertung der Emissionen hinsichtlich kanzerogenen, mutagenen und reproduktionsrelevanten Gefahrstoffen sowie den explosionstechnischen Aspekten.

Eine Vorstellung der Funktionen dieser Datenbank erfolgte im virtuellen Projektreunion am 20.01.2022.

Es wurden Konzepte für der Erfassung und Abscheidung von partikel- und gasförmigen Emissionen erarbeitet. Die Konzepte sind in den folgenden Abbildungen auszugsweise dargestellt.

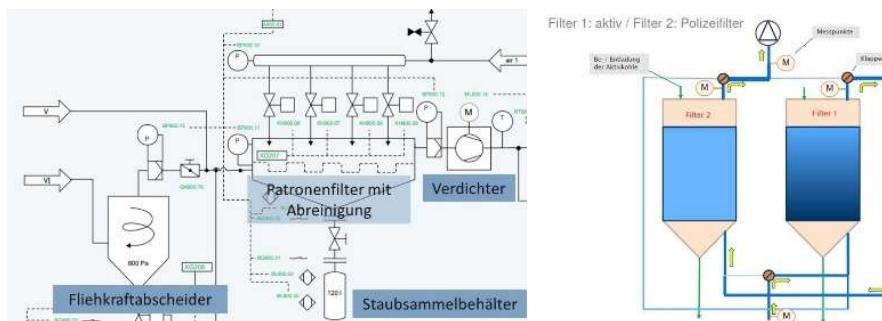


Abbildung 5: Konzepte zur Abscheidung partikel- und gasförmiger Emissionen

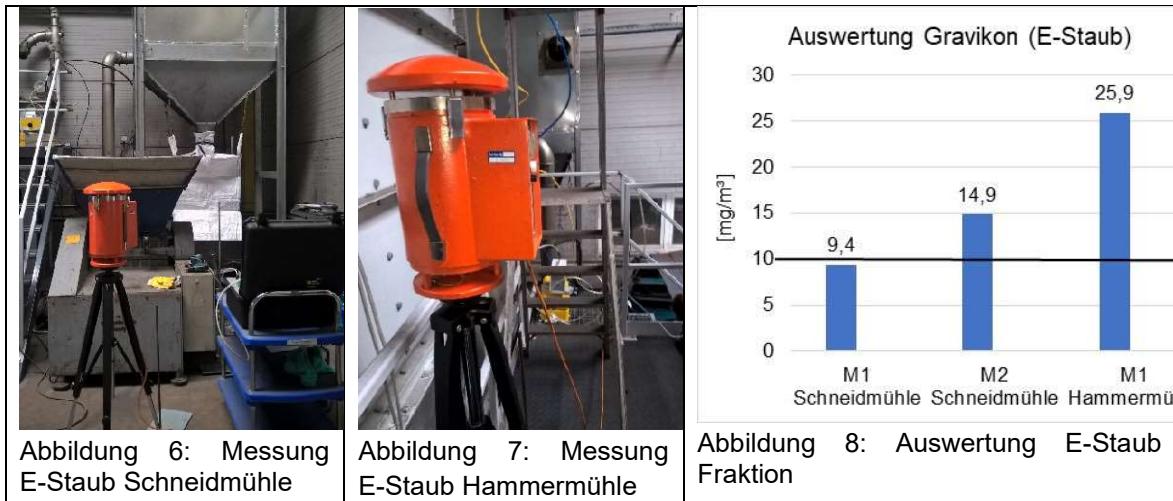
Seitens ULT/ILK erfolgte die Ermittlung der Staubemissionen am 24.3.2022 während der Zerkleinerung von Aktivkohle-beschichteten Alu-Folien aus der Produktion der Fa. Skeleton. Die Ermittlung der Partikelcharakteristik erfolgte durch den Projektpartner Fraunhofer IWS.

Folgende Messtechnik wurde seitens ULT eingesetzt.

### 1. Gravikon VC 25

Dieses Probenahmesystem eignet sich zur stationären Probenahme von E-Staub (nach IFA 7284) und A-Staub (Feinstaub) (nach IFA 6068) am Arbeitsplatz. Das Probenahmegerät VC 25 HS enthält ein Turbinengebläse und eine Volumenstromregelung, die den Durchfluss so regelt, dass während der Probenahme ein konstanter Luftvolumenstrom von  $22,5 \text{ m}^3/\text{h} \pm 5\%$  aufrechterhalten wird (unabhängig von der Umgebungstemperatur, dem Luftdruck und dem Filterwiderstand).

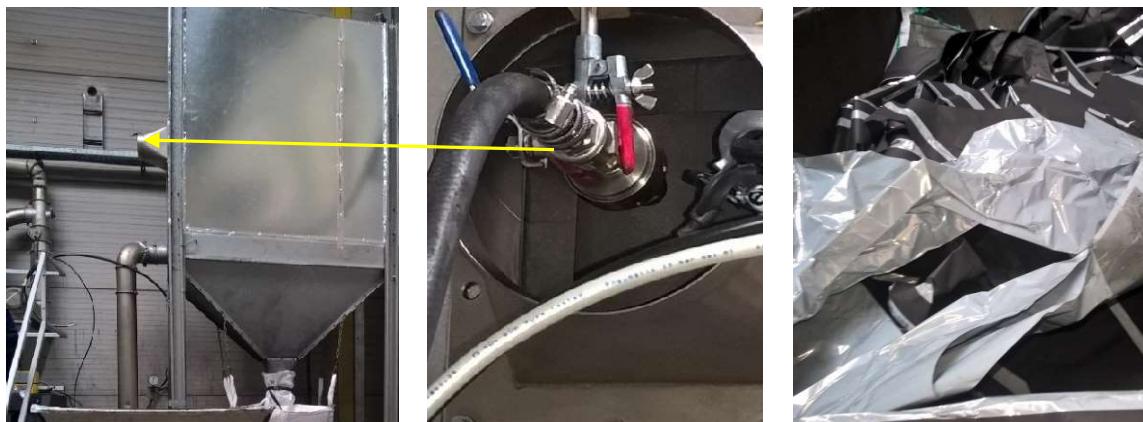
Das Messgerät wurde im Bereich des Bedieners in 1,5 m Höhe aufgebaut und es erfolgten 2 Messungen beim Betrieb der Schneidmühle sowie eine Messung beim Betrieb der Hammermühle. Auf Grund der erwartet hohen Emissionen erfolgte lediglich der Ermittlung der E-Staub Fraktion.



Es hat sich gezeigt, dass die mechanische Zerkleinerung prinzipiell gut funktioniert, jedoch auf Grund der feinen Partikelgröße und einer mechanischen Undichtigkeit am Schlauchfilter die Arbeitsplatzgrenzwerte bei M2 Schneidmühle und M1 Hammermühle nicht eingehalten werden konnten. Vom Projektpartner SIC erfolgte eine mechanische Anpassung im Anschluss der Messungen.

## 2. Manuelles gravimetrisches Verfahren für die Ermittlung der Emissionskonzentration Gesamtstaub (DIN EN 13284 Bl.1)

Zur Ermittlung der Reingaskonzentrationen bzw. maßgeblich zur Analyse der Inhaltsstoffe bei der Verarbeitung von aktivkohlebeschichteten Alu-Folien wurde ein mit Quarzfilter bestückter Probenahmekopf in den jeweiligen Reingasbereich installiert und 15 min. Mittelwerte beprobt. Die Analyse erfolgte auf Emissionskonzentration und Staubinhaltstoffe Al, Ni, und Fe. Dazu die Quarzfilter mit ICP-OES Methode nach Königswasseraufschluss mit Mikrowelle analysiert. Auf Grund der Charakteristik des Ausgangsstoffes wurde auch die Analyse der Stoffe Cr, Co, Mn und V im Rahmen der erfolgten Messung verzichtet.



Erwartungsgemäß waren auf Grund der mechanischen Beanspruchung am Filter sehr hohe Staubgehalte (siehe Abbildung 9 - 11) nach dem Abscheider der Schneidmühle nachweisbar. Dies

erklärt auch die hohen Staubkonzentrationen im Arbeitsbereich, da das Reingas direkt zurückgeführt wird.

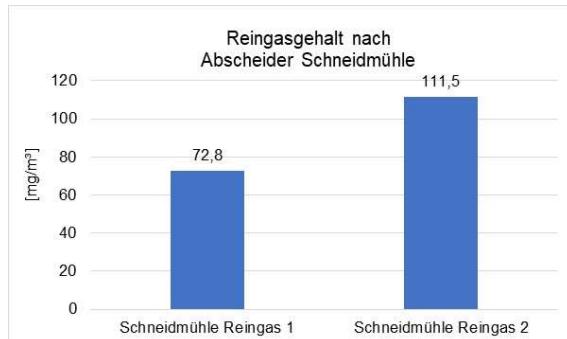


Abbildung 12: Reingas Schneidmühle

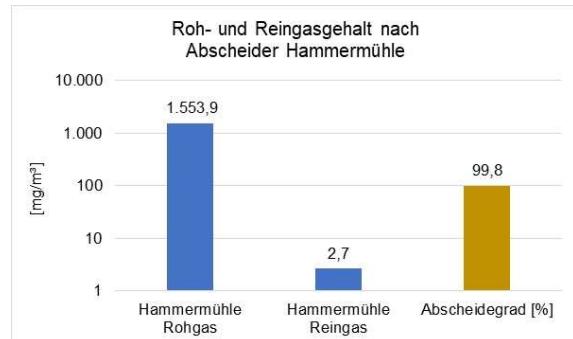


Abbildung 13: Abscheidegrad an der Hammermühle

Für die Hammermühle wurden Messungen im Roh- und Reingas vorgenommen. Hier zeigt sich, dass ein hoher Abscheidegrad vom über 99 % erreicht wurde.

Die Analyse der Staubinhaltstoffe ergab die Ergebnisse in Tabelle 1. Dem gegenübergestellt sind die Grenzwerte für Nickel (Tabelle 2) welche sicher eingehalten wurden.

Tabelle 1: Staubinhaltstoffe

	Al µg/m³	Ni µg/m³	Fe µg/n
Schneidmühle Reingas 2	234,3	0,8	192
Hammermühle Reingas	4,7	0,5	3
< Nachweisgrenze			

Tabelle 2: Grenzwerte Ni und Ni-Verbindungen

#### Zusammenfassung AGW/ERB-Ableitung Nickel und Nickelverbindungen

Stoff(gruppe)	Startpunkt	Wertetyp	Konzentrat (µg Ni/m³ A-Fraktio)
<b>Eintrag in TRGS 900</b>			
Nickelmetall	NOAEC = 30 µg Ni/m³ (Ni und NiSO <sub>4</sub> ; Entzündung Lunge)	AGW (Lungenentzündung)	6
Schwangerschaftsgruppe Y, Spitzenbegrenzung II(8)			
<b>Eintrag in TRGS 910</b>			
Nickelverbindungen <sup>1</sup>	hT25 = 491 µg Ni/m³ (Ni <sub>3</sub> S <sub>2</sub> ; Lungenkrebs)	Risiko 4:1.000	13

Der gelb unterlegte Wert liegt unterhalb der Nachweisgrenze. Die hohen Gehalte an Aluminium und Eisen beim Prozess der Schneidmühle ist nachvollziehbar und können als ein erstes Ergebnis für ein potenziell stoffliches Recycling interpretiert werden.

Die konzeptionelle Umsetzung einer Absaug- und Filtertechnik für das Verfahren bei ImpulsTec wurde erarbeitet und ein entsprechendes Filtergerät für die Erfassung und Abscheidung von gas- und partikelförmigen Bestandteilen zur Verfügung gestellt.

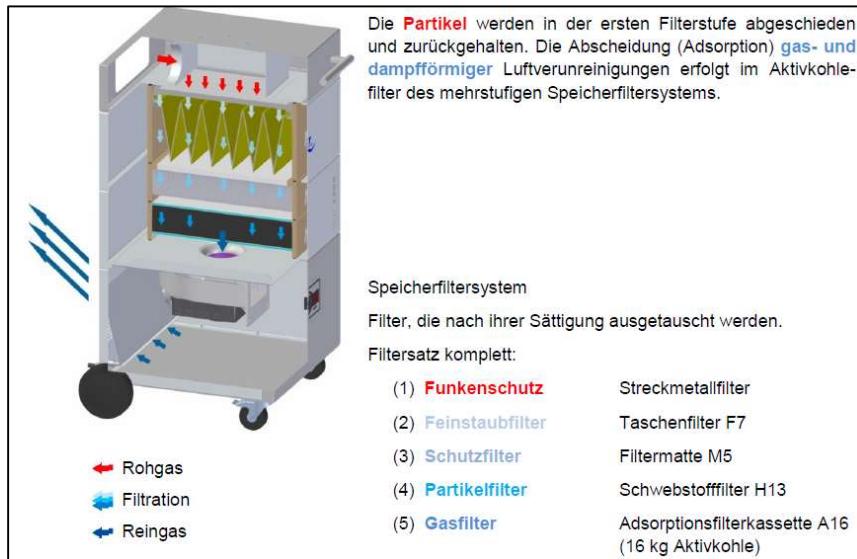


Abbildung 14: konzeptionelle Umsetzung einer Absaug- und Filtertechnik für Anwender ImpulsTec

Messungen bei und mit der Fa. Agro Drisa wurden am 19.07.2022 in Elstra durchgeführt. Hier wurden Möglichkeiten des Recyclings von Li-Batterien untersucht. Speziell bei der Zerlegung tritt das Elektrolyt aus und muss abgesaugt werden. Die Absaugung und Abscheidung erfolgt über einen Aktivkohlefilter. Im Rahmen der Messungen wurde zunächst die Gesamt-Kohlenstoffkonzentration nach dem installierten Aktivkohlefilter auf der Reingasseite mittels Flammenionisationsdetektor (FID) bestimmt. Um die Messdaten beim Versuch mitzuerfassen, wurde ein elektronischer Datenschreiber Ecograph T RSG35 der Fa. Endress + Hauser eingesetzt. Es erfolgte aber auch eine Probenahme direkt aus dem Lager-Behälter einer demontierten Zelle und an der Entgasungs-Vorrichtung.



Abbildung 15: Batteriezelle geöffnet

Abbildung 16:  
Messenordnung nach  
Aktivkohlefilter

Abbildung 17: FID-Messgerät

In der ersten Versuchsphase wurden die Grundbelastung auf der Reingasseite des Aktivkohlefilters ermittelt Abbildung 16. Zur Gegenüberstellung aller Versuchsphasen erfolgte eine logarithmische Darstellung. Gut zu erkennen ist der Peak, der bei der Messung direkt im Lagerbehälter (Eimer) entsteht. Auch gut zu erkennen ist, dass die Rohgaskonzentration am Beginn der Entgasungsphase unter der Reingaskonzentration liegt. Das bedeutet, dass die Aktivkohle schon eine Grundbeladung aufweist und bei niedriger Anströmkonzentration desorbiert.

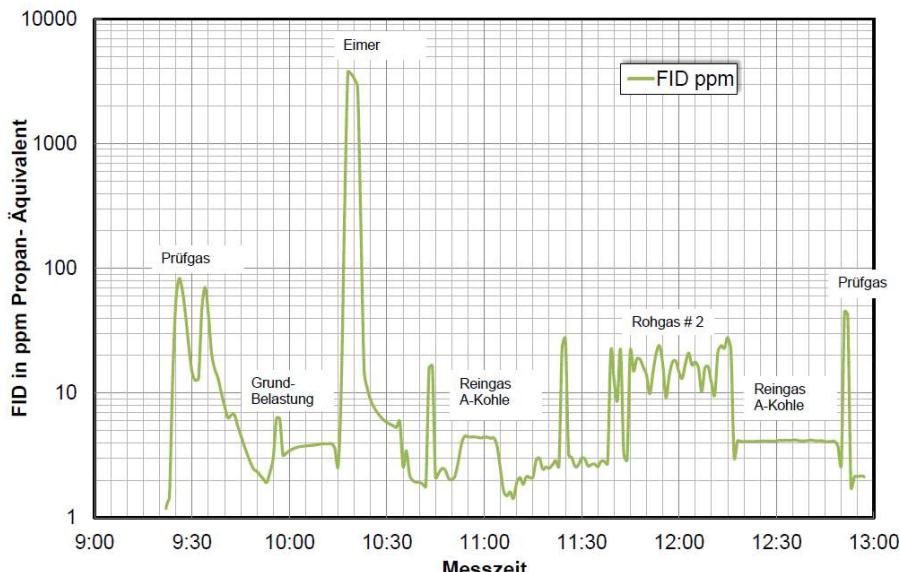


Abbildung 18: Gesamt-C als Propan-Äquivalent

Die Absaugleistung über der Messzeit lag annähernd konstant bei 300 m<sup>3</sup>/h. Daraus ergeben sich die in Tabelle 3 zusammengestellten Emissions- Parameter. Wenn die Grundbeladung des Abscheiders zum Abzug gebracht wird, ergibt sich eine Abscheideleistung der Aktivkohle von ca. 93 % für die emittierten Stoffe.

Tabelle 3: Emissionsparameter

Messung	FID	Emissions- konzentration	Emission Gesamt-C
	ppm Propan	mg Ges.-C/m <sup>3</sup>	kg/h
Grundbelastung A-Kohle	3,8	6,1	0,0018
Messung Eimer direkt	3246,4	5226,7	1,57
Reingas Abscheider #1	4,4	7,1	0,0022
Rohgas Phase #1	4,1	6,6	0,002
Rohgas Phase #2	14,6	23,5	0,0071
Reingas Abscheider #2	4,8	7,7	0,0024
Rohgas	14,6	ppm	
Reingas (abzügl. Grundbelastung)	1	ppm	
Abscheidegrad	93,2	%	

Gemäß Neufassung der Ersten Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft – TA Luft) vom 18. August 2021 (GMBI 2021 Nr. 48-54, S. 1050) gilt für organische Stoffe im Abgas, ausgenommen staubförmige organische Stoffe ein Emissionsgrenzwert von 0,5 kg/h (Massenstrom) oder 50 mg/m<sup>3</sup> (Konzentration), jeweils angegeben als Gesamtkohlenstoff.

Gemäß den durchgeführten Messungen wurde der Emissionsgrenzwert deutlich unterschritten. Es wurden aber keine Einzelstoffe ausgewertet. Für eine zukünftige Kalkulation für Abscheidetechnik kann eine Emission von 3 g/ Zelle zu Grunde gelegt werden.

Am 01.12.2022 erfolgten Messungen bei der Impulstec. Dabei lag der Fokus auf der Erfassung und Abscheidung von Elektrolyten aus der Gasphase. Ein Teilstrom der Abluft wurde durch ein Wasserbad geleitet, um evtl. organische Verbindungen im Wasser zu lösen. Die Wasserproben wurden mit einem FT-IR-Spektrometer untersucht. Es wurden keine organischen Verbindungen wie DEC oder EMC im Wasser festgestellt ( $> 5\text{ ppm}$ ).

Es wurden neue Probenahmeverfahren (Schema siehe Abbildung 19) recherchiert, welche in einem Anschlussprojekt (Quelle: Zhong, Xuehu; Liu, Wei; Han, Junwei; Jiao, Fen; Qin, Wenqing; Liu, Tong (2020). Pretreatment for the recovery of spent lithium ion batteries: theoretical and practical aspects. Journal of Cleaner Production, 263(), 121439-. doi:10.1016/j.jclepro.2020.121439 ) zum Einsatz kommen werden.

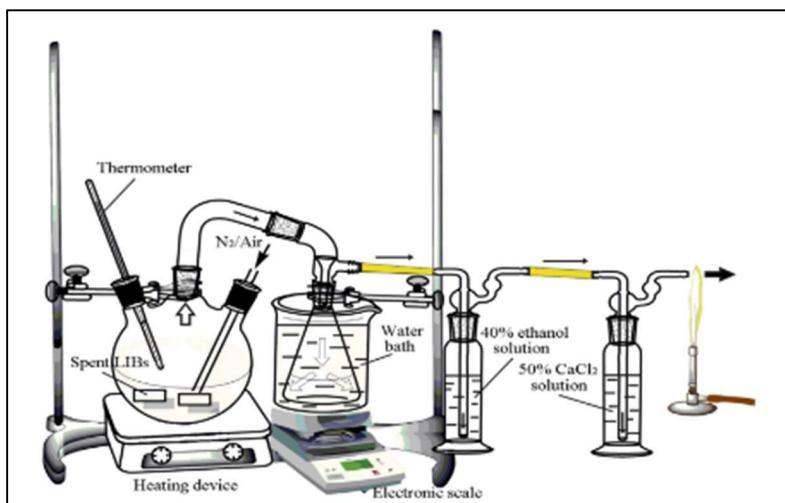
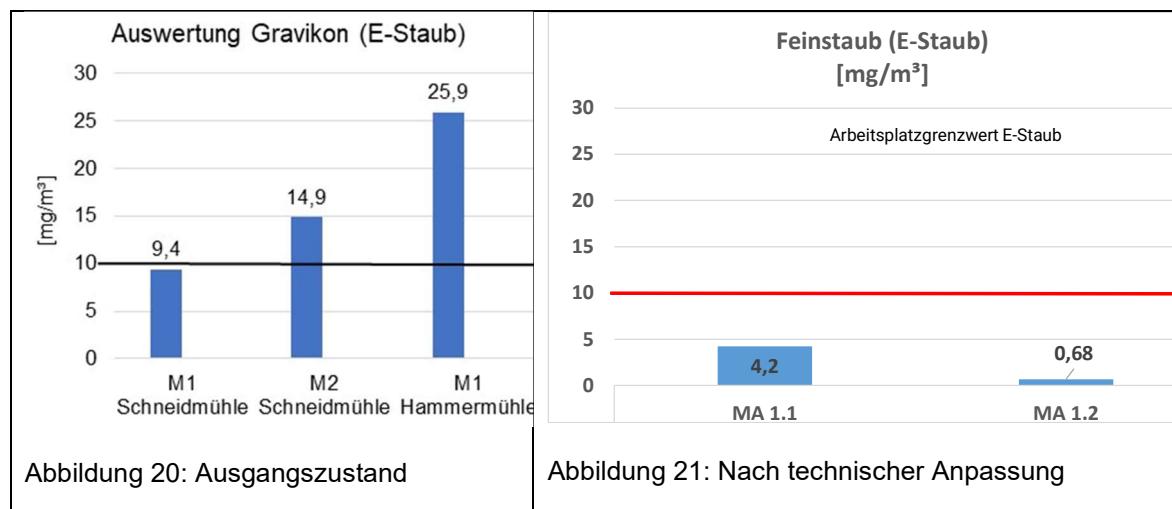


Abbildung 19: Probennahme mittels Niedertemperaturverflüchtigung

Des Weiteren erfolgten Messungen zur Partikelfreisetzung beim Schneid- und Siebprozess bei der Firma SiC-Recycling am 21.12.2022. Dabei konnte nachgewiesen werden, dass die technischen Maßnahmen zu einer deutlichen Reduktion der Emissionen geführt haben.



Zur Beurteilung der Staubkonzentrationen hinsichtlich Explosionsschutz wurden im Inneren des Siebes ebenfalls Proben während des Siebprozesses genommen. Dazu wurde über eine abschließbare flexible Leitung ein definierter Volumenstrom abgesaugt und über einen Filterkopf die Staubmenge gesammelt (Abbildung 22). Damit kann die Konzentration entsprechend ermittelt werden.



Abbildung 22: Probenahme Staubkonzentration im Inneren der Schneidmühle

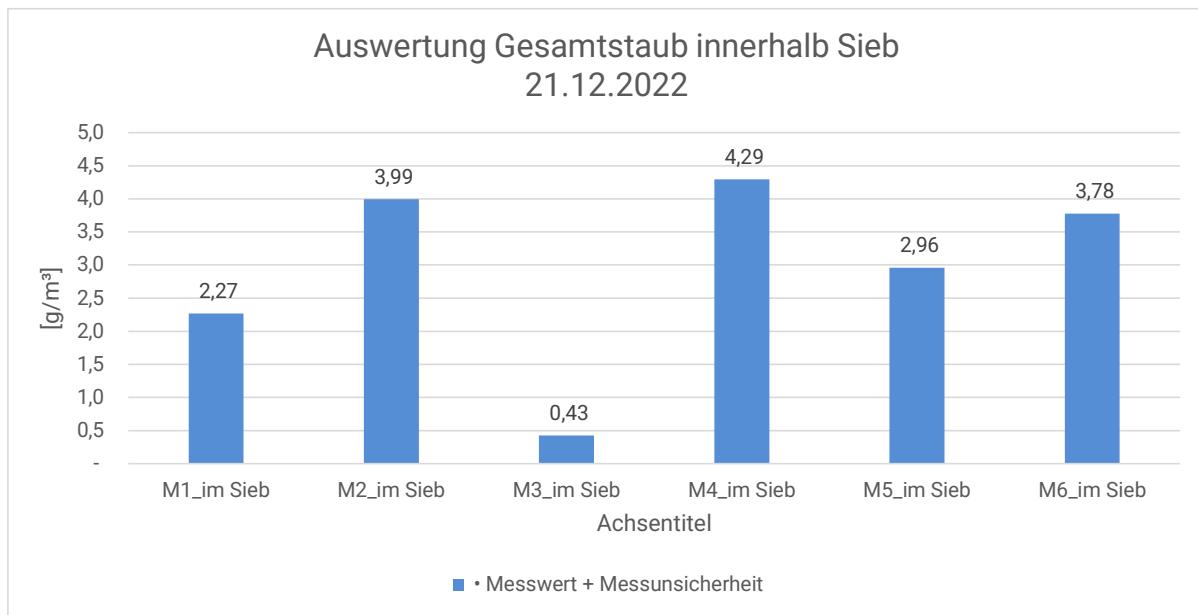


Abbildung 23: Auswertung Staubkonzentration im Sieb

Parallel dazu wurde eine Probe zur Ermittlung sicherheitstechnischen Kennzahlen, insbesondere der unteren Explosionsgrenze (UEG) an die IBExU übermittelt. Im Ergebnis wurde ein mittlerer Medianwert von 18 µm ermittelt.

Tabelle 4: Korngrößenverteilung, ermittelt durch Luftstrahlsiebanlage (IBExU Bericht IB-23-5-0027)

Fraktion in µm	Kornanteil in Masse-%
< 11	40
< 20	53
< 32	55
< 63	66
< 125	83
< 250	97
< 500	99
Mittlere Korngröße als Medianwert im RRSB-Netz	18 µm

Die ermittelte untere Explosionsgrenze (UEG) wurde mit 60g/m³ ermittelt. Das bedeutet dieser Staub ist normal zündempfindlich.

Gegenüber den ermittelten Werten liegt die Konzentration im Inneren der Siebanlage im Rahmen der erfolgten Messung < 10% UEG. Jedoch sollten in konservativer Herangehensweise dennoch wirksame Zündquellen sicher ausgeschlossen werden.

Seitens der ULT AG erfolgt auf Grundlage der ermittelten Ergebnisse die Grundlagendokumentation gemäß

§ 6 Abs. 9 GefStoffV. Diese wurde dem Projektpartner zur weiteren Bearbeitung übergeben.

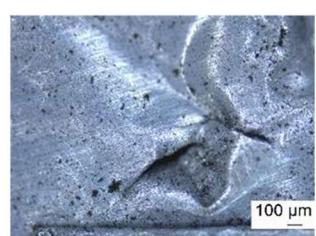
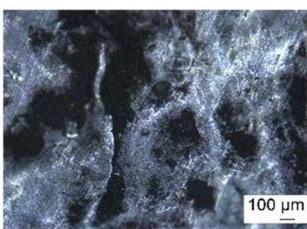
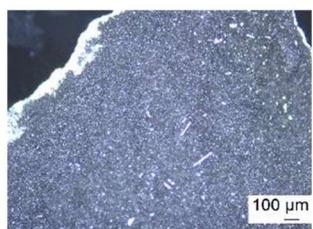
### **Ergebnisse AP 6**

Nach erfolgter Erprobung werden aus den unterschiedlichen Filterstufen Proben für die weiterführende Analytik entnommen. Es wurden zwei Fraktionen entnommen:

Probe 1: Alufraktion (nach Absiebung 400µm)

Probe 2: Graphitfraktion (nach Absiebung 400µm)

Alu-Fraktion



Graphit-Fraktion

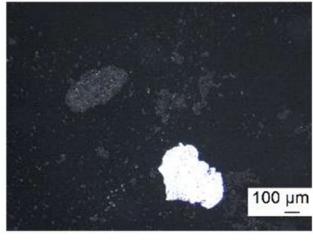
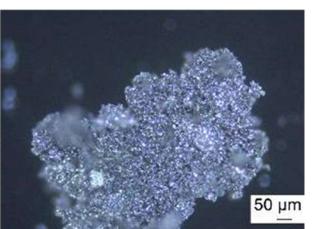


Tabelle 5: Stoffanalyse

Bezeichnung	Probenart	Probenherkunft	Datum Probenahme
Alufraktion nach Absiebung 400 µ	Metall-Chips	ULT (Projektpartner)	21.12.2022
Kohlefraktion nach Absiebung 400 µ	Staub	ULT (Projektpartner)	21.02.2022

Grund der Untersuchung: Analyse bezgl. Aluminium, Silizium und Kohlenstoffgehalt

#### Ergebnisse

Parameter		Alufraktion	Kohlefraktion	Methode
Aluminium	mg/g	850	33,2	
	%	85,0	3,32	DIN EN ISO 11885 ICP-OES nach Königswasseraufschluss
Silizium	mg/g	0,1	0,07	
	%	0,01	0,007	
Kohlenstoff als Glühverlust aus Trockenmasse	%	19,2	n.b.	Glühverlust nach DIN EN 15935 (550 °C)
Trockenrückstand		99,4	93,9	Trocknung bei 110 °C

Das Aluminium wies einen Restkohlenstoffgehalt von 19,2 Ma.-% auf. Der Aluminanteil der Graphitfraktion lag bei 3,32 Ma.-%. Verunreinigungen durch Silizium waren vernachlässigbar.

Konzeptionell besteht die Möglichkeit die Alufraktion zu pressen und der normalen Metallverwertung zuzuführen. Die Graphitfraktion kann, wenn die Qualität für ein stoffliche Verwertung nicht gegeben ist, einer thermischen Verwertung zugeführt werden.

In weiterführenden Arbeiten muss untersucht werden, inwieweit das Material einer Vermarktungsqualität entspricht.

## 2. Wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die wichtigsten Positionen des Zahlenmäßigen Nachweises sind im Verwendungsachweis (separates Dokument bzw. werden hier entsprechend kurz nachgepflegt) enthalten.

## 3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die geleisteten Projektarbeiten hinsichtlich der messtechnischen Begleitung der unterschiedlichen Aufbereitungsverfahren, der Konzeption und Realisierung der spezifischen Erfassungs- und Abscheidetechnologie sowie deren Erprobung und Dokumentation in Hinblick auf Explosions- und Arbeitsschutzzschutz, ging über das ursprüngliche Maß der geplanten Arbeiten hinaus, war aber zu Erreichung der Projektergebnisse der ULT AG notwendig und angemessen.

## 4. Voraussichtliche Nutzen, insbesondere die Verwertbarkeit der Ergebnisse

Kurzfristig werden die Projekterfahrungen von Nutzen sein, um Kunden für komplexe Aufgabenstellungen sichere und effiziente Anlagen anbieten zu können. Auf Basis der umfangreichen Messungen konnten sowohl für die mechanische als auch hydrobasierte Verfahren Konzepte erarbeitet werden, um Emissionen im Arbeitsbereich und Abluft entsprechend der jeweiligen Erfordernisse zu erfassen und mittels spezieller Filter- und Adsorptionstechnologien abzutrennen.

Langfristig ist abzusehen, dass der Industriebereich der Batteriezellfertigung und deren Recycling national und auch global weiterwächst. Die ULT AG kann hier als kompetenter Partner zur Realisierung der Aufbereitung von Prozessatmosphären präsent zu sein. Die im Projekt erarbeiteten Ergebnisse können in zukünftige Anlagenlösungen einfließen.

## **5. Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen**

Neben der weiteren Verbreitung der Technologie wurde während der Projektbearbeitungszeitraums bei allen Projektpartner vermehrt Anfrage zur Aufbereitung von unterschiedlichsten Batterietypen gestellt. Im Allgemeinen hat sich der prognostizierte Trend der Batterieherstellung nicht nur bestätigt, sondern ist weit darüber hinaus gegangen und damit auch das Erfordernis des Recyclings. Ein weiterer Aspekt, welcher gerade die Technologieentwicklung im Bereich Batterierecycling so wichtig macht, sind die Vorgaben der Europäischen Union zu Recyclingquoten und Rückführung von recyceltem Material für die Herstellung neuer Batterien. Diese Forderungen werden in kürzester Zeit auch auf nationaler Ebene bindend werden, was die Dringlichkeit und Wichtigkeit des Vorhabens unterstreicht. Damit ist klar erkennbar, dass im Vorhaben wichtige Grundlagen geschaffen wurden, um neue Technologien zu etablieren.

## **6. Erfolgte oder geplante Veröffentlichung der Ergebnisse nach Nr. 5 der NKBF**

Seitens ULT erfolgte die Veröffentlichung der Ergebnisse im Rahmen des ULT-Symposiums (05/2022) sowie auf der Internetseite des Unternehmens.