

# Abschlussbericht

<b>Kurzbezeichnung des Vorhabens</b>	
<b>- ALISA - Advanced Lithium-Sulfur batteries with ultramicroporous carbons</b>	
<b>Zuwendungsempfänger:</b>  Heraeus Battery Technology GmbH  Reinhard-Heraeus-Ring 23  63801 Kleinostheim	<b>Förderkennzeichen</b>  03XP0504B
	<b>Laufzeit des Vorhabens</b>  01.09.2022 -  31.08.2025 (30.11.2023)
<b>Projektleiter</b>  Dr. Juhan Lee	<b>Berichtszeitraum</b>  01.09.2022 - 30.11.2023

## 1 Kurze Darstellung

Das ALISA-Projekt zielt darauf ab, die Leistung und Stabilität von Lithium-Schwefel (Li-S) Batterien durch die Entwicklung innovativer kohlenstoffhaltiger Materialien und verbesserte Elektrolytzusammensetzungen zu optimieren. Dabei sollen neuartige kohlenstoffhaltige Materialien mit angepasster Ultramikroporosität und Makroporosität produziert und die Prozesse der Elektrodenverarbeitung sowie die elektrochemische Charakterisierung von Li-S Batterien mit Festkörper-Schwefel zu Lithiumsulfid-Konversion kontrolliert (SSC) werden.

Das Projekt basiert auf bereits bestätigten Konzepten und Forschung im Bereich Batterietechnologien, einschließlich existierender Patente und Methoden. Ein wichtiger Aspekt dabei ist die Nutzung von Ultramikroporen-Kohlenstoffen und flüssigen Carbonatelektrolyten, die vielversprechende Wege zur Verbesserung der Energieeffizienz und Lebensdauer von Batterien darstellen. ALISA zielt darauf ab, das aktuelle Technologiereife-Level (TRL) von 3 auf 4 zu erhöhen, indem funktionale Prototypen entwickelt werden. Schlüsselherausforderungen wie unzureichende Schwefel-Massenladungen, ungenügende Zellkapazitäten und mangelndes Verständnis der SSC in Mikroporen sollen angegangen und gelöst werden.

In dem Projekt arbeiten verschiedene Partner zusammen, um das Gesamtziel zu erreichen. Jeder Partner bringt seine spezifischen Fachkenntnisse und Fähigkeiten ein. Das NIC (Slowenien) übernimmt die Gesamtkoordination des Projekts und ist für die Entwicklung von Kathoden auf Basis von Modulkohlenstoffen und hierarchischen Kohlenstoffen mit Schwefel verantwortlich. Die ETH (Schweiz) ist für die Charakterisierung des Energiespeicherprozesses und die Identifizierung von Degradierungsmechanismen zuständig. Das INM liefert Kohlenstoffe mit präzise einstellbarer Porenstruktur für das Projekt. Heraeus steuert ein innovatives Kohlenstoffmaterial (Porocarb®) bei, das sich durch eine makroporöse Porenstruktur auszeichnet, die für den Ionentransport besonders geeignet ist. Dieses Material wird im Rahmen des Projekts zusätzlich aktiviert, um Ultramikroporen zu erzeugen.

Eine Schlüsselkomponente des Projekts ist die enge Zusammenarbeit zwischen den Partnern und der Austausch von Informationen und Forschungsergebnissen. Kommunikationsmaßnahmen wie regelmäßige Meetings und die Koordination von Arbeitspaketen tragen zur Realisierung der Projektziele bei.

Während der Projektlaufzeit wurden bereits wichtige Ergebnisse erzielt. So hat HBT umfangreiche Analysen durchgeführt, um die Anforderungen und Herausforderungen in Bezug auf kohlenstoffhaltige Materialien zu erfassen. Basierend auf diesen Erkenntnissen wurden verschiedene Porocarb-Proben hergestellt und auf ihre Leistung getestet. Zudem wurde ein CO<sub>2</sub>-Aktivierungsprozess zur Modifikation des Porocarbs entwickelt. Die optimierten Kohlenstoffe wurden im Pilotwerk von HBT auf Kilogrammbasis produziert.

Heraeus musste vorzeitig aus dem ALISA-Projekt aussteigen, welches von den verbleibenden Partnern fortgesetzt wird. Obwohl dadurch kurzfristige wirtschaftliche Erfolge ausblieben, besteht die Hoffnung, dass die im Laufe des Projekts gewonnenen Erkenntnisse und entwickelten Technologien in der mittleren bis langen Frist (3-5 Jahre) einen Markt für Li-S Anwendungen schaffen könnten.

Trotz der Herausforderungen und des vorzeitigen Ausstiegs konnte Heraeus wertvolle Erfahrungen sammeln und Fachwissen aufbauen. Diese Erkenntnisse könnten in zukünftige Projekte einfließen und den wissenschaftlichen Fortschritt in diesem Bereich vorantreiben. Gleichzeitig besteht die Hoffnung, dass die im Rahmen des Projekts entwickelten Technologien und Methoden in anderen elektrochemischen Systemen Anwendung finden und so zur Stärkung der Wettbewerbsfähigkeit und Weiterentwicklung der Batterietechnologie beitragen können.

## 2 Eingehende Darstellung

Das ALISA-Projekt beabsichtigt, die bestehenden Herausforderungen Lithium-Schwefel (Li-S) Batterien zu transformieren, indem es sich auf die Entwicklung innovativer kohlenstoffhaltiger Materialien für Kathoden und die Optimierung von Elektrolytzusammensetzungen zur Verbesserung der Leistung und Stabilität konzentriert. Die drei spezifischen Zielsetzungen des Projekts sind die Produktion neuartiger kohlenstoffhaltiger Materialien mit angepasster Ultramikroporosität und Makroporosität, die Kontrolle der Elektrodenverarbeitung und elektrochemische Charakterisierung von Li-S Batterien mit Festkörper-Schwefel zu Lithiumsulfid-Konversion (SSC) und die Erweiterung der Materialcharakterisierungstechniken für verbesserte Kapazitäten.

Das Projekt basiert auf vorangegangener Forschung und bereits bestätigten Konzepten im Bereich der Batterietechnologien, einschließlich existierender Patente und Methoden im Zusammenhang mit Li-S Batterien. Es nutzt Ultramikroporen-Kohlenstoffe und flüssige Carbonatelektrolyte, die eine hohe Energie und eine lange Lebensdauer versprechen. Hierbei soll das Technologiereife-Level (TRL) von derzeit 3 auf 4 erhöht werden, indem funktionale Prototypen entwickelt werden. Herausforderungen, wie unzureichende Schwefel-Massenladungen, ungenügende Zellkapazitäten und Limitierungen im aktuellen Verständnis der SSC in Mikroporen, sollen angegangen und gelöst werden. Das Prinzip der SSC in flüssigen Elektrolyten, kombiniert mit Ultramikroporen-Kohlenstoff-Kathoden, wurde bereits nachgewiesen. ALISA zielt darauf ab, diese Methodik zu optimieren, indem maßgeschneideter Kohlenstoff-Kathodenmaterial und verbesserte Elektrolytzusammensetzungen eingesetzt werden. Bestehende Kohlenstoffelektrodenmaterialien wie Porocarb, zur Verfügung gestellt von Heraeus, sollen innerhalb dieses Projekts optimiert werden.

Das Projekt profitiert von der synergetischen Fachkompetenz der Partner. NIC (Slowenien) übernimmt die Gesamtkoordination des Projekts und die Entwicklung von Kathoden basierend auf Modellkohlenstoffen und hierarchischen Kohlenstoffen mit Schwefel. Die ETH (Schweiz) setzt innovative *in-situ*-Methoden ein, um den Energiespeicherprozess zu charakterisieren und Degradierungsmechanismen zu identifizieren. Das INM liefert für das Projekt karbidabgeleitete Kohlenstoffe mit präzise einstellbarer Porenstruktur. Das Unternehmen Heraeus steuert ein innovatives Kohlenstoffmaterial (Porocarb®) bei, das eine makroporöse Porenstruktur aufweist, die für den Ionentransport besonders geeignet ist. Im Rahmen des Projekts wird dieses Material zusätzlich aktiviert, um Ultramikroporen zu erzeugen.

## 2.1 Planung, Ablauf, und Zusammenarbeit

Zur Übersicht der im Folgenden dargestellten Ergebnisse ist der gesamte Projektzeitplan in **Abbildung 1** gezeigt.

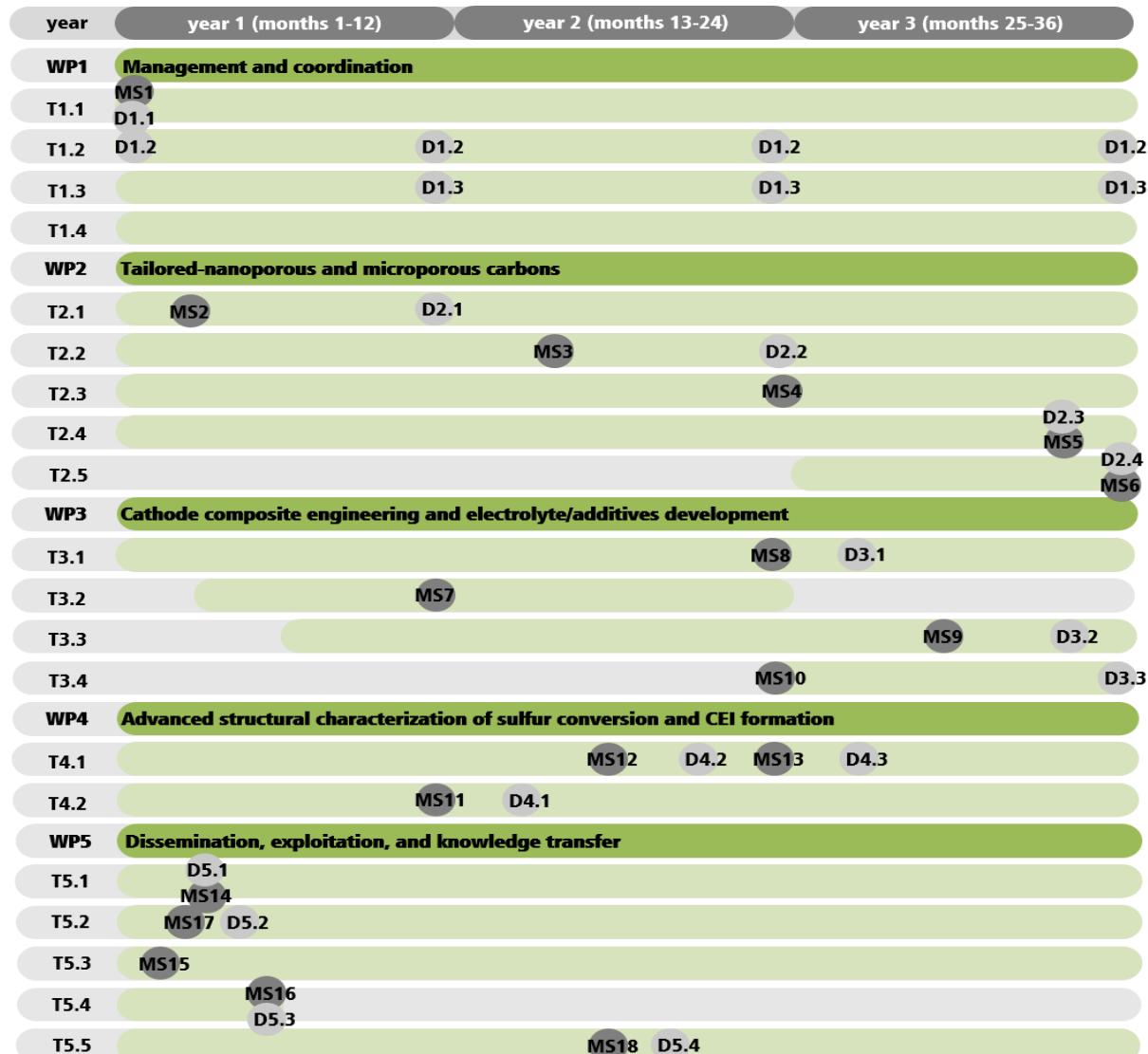


Abbildung 1 Balkendiagramm aus Gesamtvorhabensbeschreibung ALISA

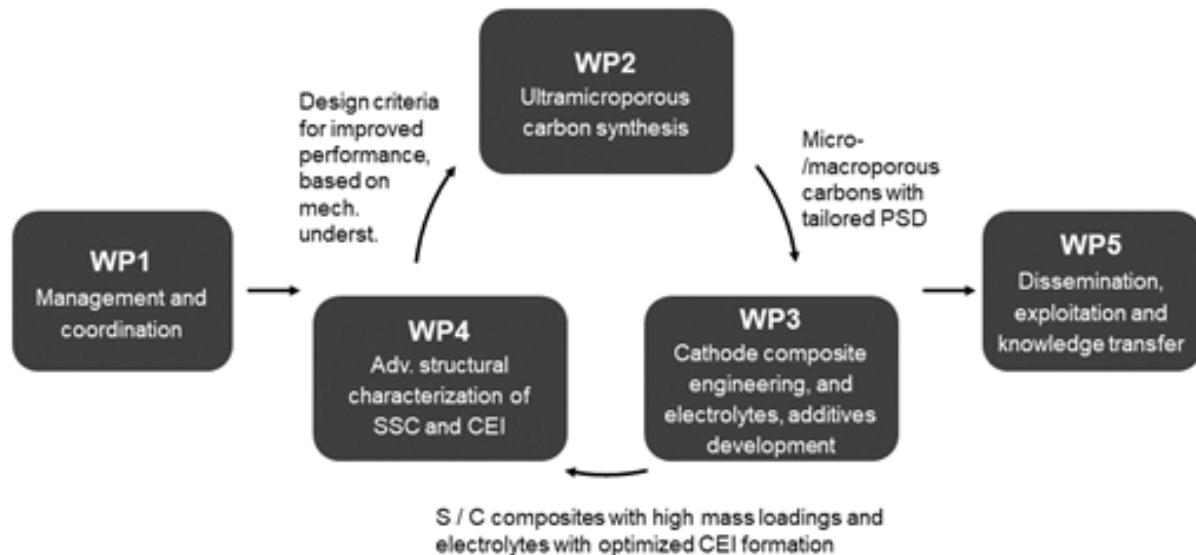
Für das Projekt trägt Heraeus Battery Technology (HBT) zu den Arbeitspaketen WP1, WP2, WP3, WP4 und WP5 bei:

- WP1 umfasst hauptsächlich administrative und organisationsbezogene Aktivitäten während der gesamten Projektlaufzeit.
- UNTER der Leitung von INM ist HBT für die Aufgaben (Unterarbeitspakete) in WP2 verantwortlich, insbesondere für T2.2, Optimierung der makroporösen Struktur, T2.3, Mikro- und makroporöse Oberfläche vereinen, T2.4, Anpassen der Oberflächenfunktionalität sowie dem Grad der Graphitisierung sowie T2.5, Auf- Skalieren der optimierten Kohlenstoffe.
- Zusätzlich unterstützt HBT die Aufgaben von WP3, Kathodenverbundtechnik und Entwicklung von Elektrolyten / Additiven, sowie die Aufgaben von WP4, Fortgeschrittene strukturelle Charakterisierung der Schwefelumwandlung und SEI-Bildung, insbesondere die Koordination und Rückmeldung der Ergebnisse an WP2.
- WP5 umfasst Verbreitungs-, Nutzungs- und Kommunikationstätigkeiten im ALISA-Projekt, einschließlich der Veröffentlichung wissenschaftlicher Ergebnisse in angesehenen

Fachzeitschriften und auf Konferenzen. HBT unterstützt bei der Koordination und der Unterstützung bei Publikationen sowie beim Businessplan.

Der Schwerpunkt von HBT liegt in WP2 auf der Synthese und Charakterisierung von Kohlenstoffmaterialien (T2.2) mit dem Hauptziel, maßgeschneiderte poröse Kohlenstoffe zu gewinnen. Hierbei werden hierarchisch poröse Kohlenstoffmaterialien mit spezifischer Mikro- und Makro-Porosität, Leitfähigkeit und Teilchengröße synthetisiert. Die von HBT hergestellten Kohlenstoffmaterialien werden anschließend vom INM weiter optimiert, um die Oberflächenfunktionalität und den Grad der Graphitisierung anzupassen. Zur Überprüfung der Eignung des Materials für die Anwendung im großen Maßstab erfolgt die Produktion der verbesserten Kohlenstoffmaterialien im Pilotwerk von HBT. Die Kohlenstoffmaterialien von WP2 werden in Kathoden in WP3 integriert und zur Verwendung in Li-S Batterien getestet.

Für die Zusammenarbeit mit dem Partner NIC, INM, und ETHZ, koordiniert NIC Austauschmeetings um den Probentransfer und die Materialanforderungen zu besprochen, Zwischenergebnisse auszutauschen, und die nächsten Schritte festzulegen. **Abbildung 2** zeigt den WP-Plan und die beteiligten Partner für einen Überblick.



*Abbildung 2 Partner in WP4 – Kathode für die Entwicklung der Gasdiffusionselektrode.*

### 3 Detaillierte Ergebnisdarstellung

#### 3.1 Bereitstellung poröser Kohlenstoff für WP2

Zu Beginn hat HBT die Herausforderungen, Anforderungen und gewünschten Eigenschaften von Kohlenstoffmaterialien erfasst. Anschließend fand eine Diskussion mit den Partnern statt, um festzulegen, welche Produkte von HBT für den ersten Test vorbereitet werden sollten, die unter dem Namen "Porocarb" bekannt sind. Daher wurde ein bereits bestehendes Produkt, L1108s (ID 5686), bereitgestellt, und es wurden insgesamt 4 verschiedene Forschungs- und Entwicklungsproben durch Änderungen der Syntheseparameter hergestellt. Nach weiteren Austauschmeetings mit Projektpartnern wurden vier Proben, mit den IDs 5686, 6731, 7013, und 7043 für T2.3 und T2.4 an das INM gesendet. Dort sollten sie auf die Vereinigung mikro- und makroporöser Oberflächen, die Anpassung der Oberflächenfunktionalität und den Grad der Graphitisierung untersucht werden. Die Morphologie und Teilchenverteilung von L1108s sind beispielsweise in **Abbildung 3** dargestellt.

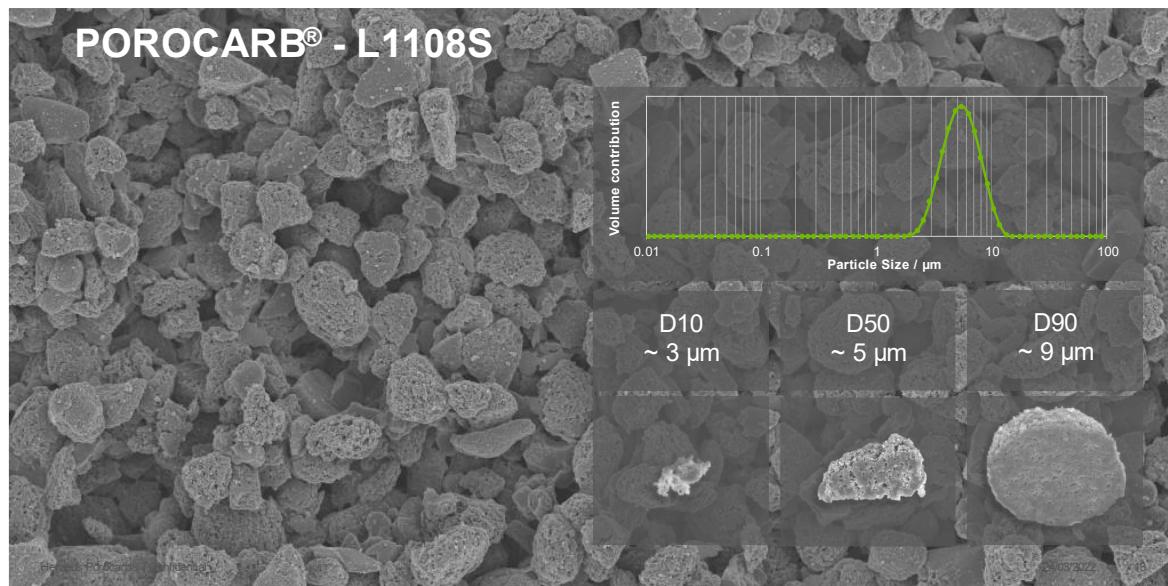


Abbildung 3 REM-Bild von Porocarb L1108s.

### 3.2 Zusätzliche Charakterisierung und erfolgreiche Abschluss für T2.2

Da die Porenstruktur und Partikelgröße die wichtigsten Parameter für den Erfolg in WP2 sind, wurden die Porocarb-Proben gründlich analysiert und die Ergebnisse in Tabelle 1 zusammengefasst. Wie in Abbildung 3 gezeigt, haben die Proben eine ähnliche Morphologie, aber die Hauptunterschiede liegen in der Partikelgröße und Porenstruktur. Aus der Synthesemethode werden die Proben mit ID5686, 6731 und 7013 zur Probengruppe "Gruppe 1" sortiert, während die Probe mit ID7043 zur Probengruppe "Gruppe 2" sortiert wird. Bei der Probengruppe Gruppe 1 liegt der Hauptunterschied in der Partikelgröße. Die größte ist Probe-5686, während die kleinste Probe-6731 ist, wie durch die Werte von D10, D50, D90 und D99 repräsentiert. Solche Werte sind typische Indikatoren für die charakteristische Partikelgrößenverteilung.

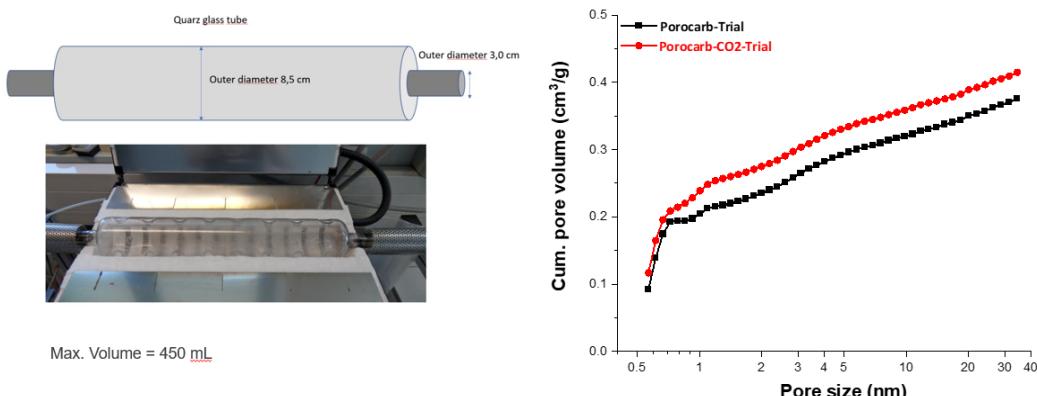
Tabelle 1 Zusammenfassung von wichtigen Eigenschaften von neuen Porocarb-Proben.

ID	BET <sub>SSA</sub> (m <sup>2</sup> /g)	D10 (μm)	D50 (μm)	D90 (μm)	Probengruppe
5686	569	3.7	6.1	9.8	Gruppe 1
6731	606	0.3	0.7	1.6	Gruppe 1
7013	549	1.1	2.4	4.2	Gruppe 1
7043	571	2.1	4.3	7.7	Gruppe 2

Im Vergleich zur Probengruppe Gruppe 1 zeichnet sich Gruppe 2 durch eine ausgeprägte Porenstruktur aus, wie sie durch CO<sub>2</sub>-Adsorption, N<sub>2</sub>-Physisorption und Hg-Porosimetrie nachgewiesen wurde. Die Probe der Gruppe 2 weist ein etwas höheres Gesamtporenvolumen im Vergleich zur Probe der Gruppe 1 auf und bietet einen höheren Anteil an Makroporen. Die Endproduktanalyse bestätigt, dass diese neue Probengruppe, Gruppe 2, die Anforderungen für Batterieanwendungen erfüllt. Somit wurde die Aufgabe T2.2 erfolgreich abgeschlossen.

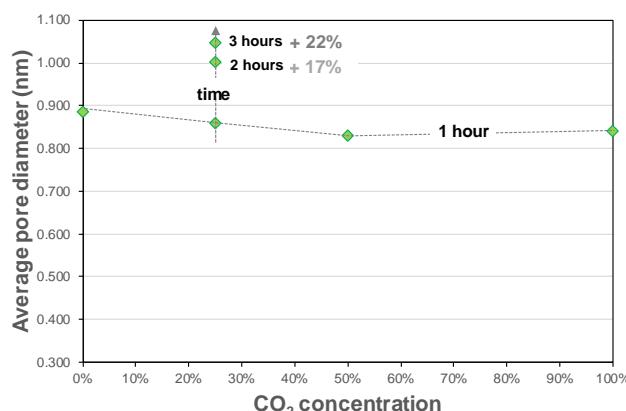
### 3.3 Porengrößeoptimierung für T2.3

Um die Kapazität der Energiespeicher zu maximieren, wird eine größere Porenvolumina bevorzugt. Um dies zu erreichen, wurde Porocarb durch einen CO<sub>2</sub>-Aktivierungsprozess modifiziert. Dieser Prozess erlaubt es, die Mikro- und Mesoporen zu vergrößern, wodurch mehr Reaktionen mit Schwefel in den vergrößerten Poren stattfinden können. Um diesen Prozess zu entwickeln, war eine Machbarkeitsstudie erforderlich, bei der die wichtigsten Prozessparameter grob identifiziert werden konnten. Diese Studie wurde im Innovationszentrum am INM mit einem Drehofen mit einem Volumen von 450 mL (**Abbildung 4, links**) durchgeführt. Für den Prozess wurde der Ofen mit porösem Kohlenstoff gefüllt und das Mischgas aus CO<sub>2</sub> und N<sub>2</sub> wurde während der Rotation und Beheizung durch den Ofen geleitet. Wie in **Abbildung 4 rechts** mittels CO<sub>2</sub>- und N<sub>2</sub>-Sorptionsanalyse dargestellt, konnte das durch den CO<sub>2</sub>-Aktivierungsprozess modifizierte Porocarb ein größeres Porenvolumen im Vergleich zum Ausgangsmaterial erreichen. Damit war die Machbarkeitsstudie im Innovationszentrum INM mit einer Produktionskapazität von etwa 60 g erfolgreich und die wichtigsten Prozessparameter wurden identifiziert. Um die Produktionsmenge zu erhöhen, hat HBT im Pilotwerk einen eigenen CO<sub>2</sub>-Aktivierungsprozess entwickelt, der eine Produktion von über 250 g pro Charge ermöglicht.



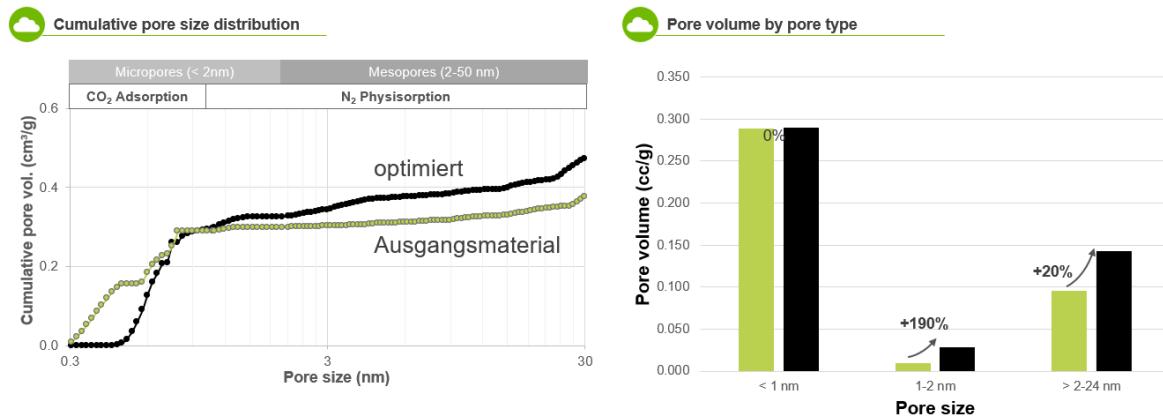
**Abbildung 4** Die CO<sub>2</sub>-Aktivierungsanlage im Innovationszentrum INM (links) und das kumulative Porenvolumen für das Ausgangsmaterial und das Material nach dem CO<sub>2</sub>-Aktivierungsprozess (rechts).

Die wichtigsten Prozessparameter für die CO<sub>2</sub>-Aktivierung sind der Anteil von CO<sub>2</sub> im Mischgas mit N<sub>2</sub>, dessen Durchflussrate, die Temperatur, und die Verweilzeit im Ofen. Im Pilotwerk von HBT wurden diese Parameter weiter optimiert. Dabei wurden beispielsweise die durchschnittlichen Porengrößen mittels CO<sub>2</sub>- und N<sub>2</sub>-Sorptionsanalyse gemessen, während der Anteil von CO<sub>2</sub> im Gas und die Verweilzeit im Ofen variiert wurden (siehe **Abbildung 5**). Da längere Verweilzeiten zu höheren Materialverlusten führen können, erfolgte die weitere Optimierung mit einem CO<sub>2</sub>-Anteil von 25% im Gas. Im Vergleich zu den Ausgangsmaterialien konnte bei einer Verweilzeit von zwei Stunden der durchschnittliche Poredurchmesser um 17% und bei drei Stunden um 22% erhöht werden.



**Abbildung 5** Der Einfluss des CO<sub>2</sub>-Anteils des Mischgases und der Verweilzeit auf den durchschnittlichen Poredurchmesser

In **Abbildung 6** (links) sehen wir das kumulative Porenvolumen der Probe nach einer Verweilzeit von 3 Stunden im Vergleich zum Ausgangsmaterial. Nach dem CO<sub>2</sub>-Aktivierungsprozess sind die Poren, die kleiner als 0,5 nm sind, größtenteils verschwunden. Da der Anteil an Poren zwischen 0,5 und 1 nm für die Probe nach der Aktivierung etwa größer ist, bleibt auch das Porenvolume unter 1 nm im Vergleich zum Ausgangsmaterial annähernd gleich, wie in **Abbildung 6** (rechts) dargestellt. Bei den Poren zwischen 1 und 2 nm verzeichnet man nach der Aktivierung jedoch eine Erhöhung des Volumenanteils um ungefähr 190%, und bei den Poren zwischen 2 und 24 nm beträgt die Zunahme 20%. Das Ergebnis der Quecksilber-Analyse zeigt, dass die Makroporenstruktur der aktivierten Proben unverändert bleibt. Das bedeutet, dass der CO<sub>2</sub>-Aktivierungsprozess lediglich die Strukturen von Mikro- und Mesoporen verändert hat. Dies unterscheidet sich von den Proben der Gruppe 2 in **Tabelle 1**, bei denen der größte Veränderungsanteil in der Makroporenstruktur zu finden ist. Mit diesen Ergebnissen wurde die T2.3 Optimierung des CO<sub>2</sub>-Aktivierungsprozesses erfolgreich abgeschlossen.



*Abbildung 6 Das kumulative Porenvolume des Ausgangsmaterials und nach dem CO<sub>2</sub>-Aktivierungsprozess (links), sowie das Porenvolume für Poren mit Durchmessern von weniger als 1 nm, zwischen 1 und 2 nm und von 2 bis 24 nm (rechts).*

### 3.4 Aufskalierung der optimierten Kohlenstoffe für T2.5

Die in **Tabelle 1** dargestellten Proben weisen eine monomodale Partikelgrößenverteilung auf. Obwohl die wirtschaftliche Attraktivität von Proben mit monomodaler Partikelgrößenverteilung im Vergleich zu Proben mit bimodaler Verteilung geringer ist, ermöglichen sie uns eine präzise Untersuchung des Einflusses der Partikelgröße auf die Batterieleistung. Die bimodale Verteilung ist zwar wirtschaftlich vorteilhafter, kann aber bei der Untersuchung der Batterieleistung zu Komplikationen führen. Dies liegt daran, dass die Leistung möglicherweise von der Elektronen-Perkolation abhängt, die von der Partikelgrößenverteilung ausgeht. Aus diesem Grund wurden die Proben mit monomodaler Verteilung zunächst hinsichtlich ihrer Batterieleistung im National Institute of Chemistry (NIC) in Slowenien getestet. Das beste Ergebnis wurde mit der Probe mit den kleinsten Partikeln (5686) erzielt, die zur Gruppe 1 gehört. Obwohl eine detailliertere Untersuchung nötig ist, deutet alles darauf hin, dass Porocarb mit kleinen Partikeln eine verbesserte Batterieleistung liefern könnte. Dies gilt insbesondere dann, wenn die Makroporenstruktur bei HBTs Standardverfahren optimiert ist, d.h. eine Modale Porengröße von 120-180 nm und ein Volumen von ca. 0,35 cc/g vorliegt.

Auf Basis der Ergebnisse von NIC wurden sechs Porocarb-Proben produziert und auf Kilogrammbasis aufskaliert, wie in **Tabelle 2** dargestellt. Um das T2.5-Projekt erfolgreich zu beenden, wurden jeweils 1 kg aus Gruppe 1 und Gruppe 3 an das INM geliefert. Diese Proben stammen aus unserer *Produktionslinie*, die eine Jahreskapazität von 100-150 Tonnen aufweist. Die Spezifikationen der Probe ID 7449 entsprechen denen der Probe ID 5686 aus **Tabelle 1**. Gemeinsam mit Probe 6731 wurden Leistungstests für Batterien durchgeführt. Hierbei lieferte Probe 6731 herausragende Ergebnisse. Aufgrund ihrer wirtschaftlichen Vorteile lieferten wir auch eine bimodale Kohlenstoffprobe (ID 5813) mit vergleichbarer Partikelgröße an das INM. Als Vergleichsmuster wurde zusätzlich eine bimodale Probe mit größeren Partikeln (ID 5952) bereitgestellt. Leider konnten die CO<sub>2</sub>-aktivierten

Proben aufgrund des vorzeitigen Ausscheidens von HBT nicht rechtzeitig für Batterieleistungstests eingesetzt werden. Trotzdem gelang es uns, den Prozess erfolgreich zu optimieren, und die Kohlenstoffe, die in der HBT-Produktionslinie hergestellt wurden, wurden im HBT-Pilotwerk weiterhin auf Kilogrammbasis aufgearbeitet.

*Tabelle 2 Aufskalierte Kohlenstoffe bei HBT für T2.5*

ID	D10 ( $\mu\text{m}$ )	D50 ( $\mu\text{m}$ )	D90 ( $\mu\text{m}$ )	PSD	Behandlung für Poren	Gruppe
6731	0.3	0.7	1.6	Monomodal	Standard	Gruppe 1
7449	3.7	6.1	9.8	Monomodal	Standard	Gruppe 1
5813	0.3	0.9	2.7	Bimodal	Standard	Gruppe 3
5952	0.4	1.6	5.4	Bimodal	Standard	Gruppe 3
7344	0.6	8	15.2	Bimodal	$\text{CO}_2$ aktiviert, hoch $\text{CO}_2$ Anteil	Gruppe 4
6903	0.3	1	2.9	Bimodal	$\text{CO}_2$ aktiviert, optimiert	Gruppe 4

## **4 Erfolgskontrollbericht (Vorlage, Verwertungstabelle)**

### **4.1 Wirtschaftliche Erfogsaussichten**

Obwohl unser Engagement im ALISA-Projekt vorzeitig beendet wurde, blieb die Hauptabsicht bestehen, bei Erfolg innovative Fortschritte zur Porositätsoptimierung von Kohlenstoffen für Lithium-Schwefel (Li-S)-Anwendungen zu erzielen. Dies hätte eine substanzielle Verbesserung der bestehenden Li-S Systeme zur Folge und gleichzeitig das Potenzial, für Heraeus essentielle Grundlagen für geistiges Eigentum und Fachwissen zu schaffen. Trotz der vorzeitigen Beendigung unseres Engagements im Projekt, besteht die Möglichkeit, dass, bei entsprechendem Fortschritt, in mittlerer bis langer Frist (3-5 Jahre) ein Markt für entsprechende Li-S Anwendungen entsteht.

Die Flexibilität der Porocarb-Produktplattform, die relativ einfach auf verschiedene Anwendungen angepasst werden kann ohne verwaltungstechnische Änderungen zu verlangen, würde es uns ermöglichen, größere Mengen schnell für eine Systementwicklungsphase bereitzustellen. Zudem liegt ein weiterer Vorteil in der Anwendung erfolgreicher Konzepte auf ähnliche elektrochemische Systeme. Bedauerlicherweise sind wegen des frühzeitigen Projektendes die kurzfristig erwarteten wirtschaftlichen Erfolge noch nicht eingetreten.

### **4.2 Wissenschaftliche und/oder technische Erfogsaussichten**

Die Realisierung zyklenstabiler Li-S Systeme stellt von technischer und wissenschaftlicher Sicht eine hohe Herausforderung dar, da gegenwärtige semi-kommerzielle Systeme nur geringe Zyklenzahlen erreichen und viele Anbieter, die diese Technologie zu kommerzialisieren versuchten, den Markt verlassen haben oder ihre Fokus verschoben haben. Zu unseren Hoffnungen zählt, dass, trotz des frühen Projektaustritts, die während des Projekts generierten Expertisen und Fähigkeiten sowie entwickelten Ressourcen einen wertvollen Beitrag zur Batterieforschung bieten und zukünftige wissenschaftliche und technische Innovationen vorantreiben können.

In unserem Projekt waren Mitarbeiterqualifikationen entscheidend. Es waren sechs Akademiker, sieben Laboranten, drei Ingenieure und zwei Werkstudenten beteiligt. Der Erwerb von Kenntnissen und die Entwicklung von Technologien spielten ebenfalls eine entscheidende Rolle. Die Teilnahme am Projekt ermöglichte unserem Team, wertvolle Erfahrungen in einem spezialisierten Bereich der Batterietechnologie zu sammeln und mit neuen Materialien wie Porocarb® zu experimentieren. Diese neu erworbenen Kenntnisse könnten unseren Mitarbeitern in ihrer zukünftigen beruflichen Laufbahn beträchtliche Vorteile bieten.

### **4.3 Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit**

Obwohl unser Engagement im Projekt frühzeitig beendet wurde, weist das erworbene Fachwissen und die Erfahrungen, die wir im Zusammenhang mit der Wirkung von Kohlenstoffadditiven wie Porocarb® auf die Batterieeffizienz und -leistung gemacht haben, vielversprechende Möglichkeiten für zukünftige Projekte und potenzielle Folgeinitiativen auf. Innerhalb des Projekts konnte Heraeus wertvolle Erfahrungen und Kenntnisse erwerben, die in zukünftigen Engagements genutzt werden könnten.

Nach erfolgreichem Abschluss des ALISA-Projekts hätten wir möglicherweise zu einer deutlichen Verbesserung der bestehenden Li-S Systeme beitragen können. Dieser Ansatz hat vielversprechende wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussmöglichkeiten.

Die Beendigung unseres Engagements im Projekt ist ohne Zweifel sowohl für Heraeus als auch für die Projektpartner enttäuschend. Dennoch wurde ein nennenswertes Netzwerk aufgebaut, und der vorzeitige Projektabschluss könnte einige dieser Verbindungen unterbrechen. Dies stellt eine Herausforderung bei der Suche nach potenziellen Verwertern und Nutzern dar. Weitere

Entwicklungsarbeit ist notwendig, um die Systemebene klar zu definieren und Vorteile gegenüber etablierten Speichermethoden darzustellen.

Verwertungsoption	Jahr	Eintretenswahrscheinlichkeit								
		Verwertungsinstrument								
kurzfristig	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Generierung von IP und Knowhow	<ul style="list-style-type: none"> <li><u>Hoch</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Forschungsberichte</li> </ul> </li> <li><u>wegen frühzeitigen Ausstiegs nicht mehr realisierbar</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Patente</li> <li>- internes Know-How</li> </ul> </li> <li><u>bereit verwertet</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Projektberichte</li> </ul> </li> </ul>									
Übertrag des Knowhows auf verwandte elektrochemische Systeme	<ul style="list-style-type: none"> <li><u>bereit verwertet</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Stärkung der Porocarb-Produktplattform für Lithiumanwendungen</li> </ul> </li> <li>➔ Das Wissen über die Dispersionsverhältnisse und das rheologische Verhalten von porösem Kohlenstoff in organischen und wässrigen Lösungen, sowie dessen Zusammenhang mit Oberflächenfunktionalgruppen und Partikelgrößenverteilung, wurde an Projektpartnern weitergegeben</li> <li><u>wegen frühzeitigen Ausstiegs nicht mehr realisierbar</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Stärkung der Porocarb-Produktplattform für Anwendungsentwicklung für verwandte Systeme</li> </ul> </li> </ul>									
Skalierung der Kohlenstoffe	<ul style="list-style-type: none"> <li><u>bereit verwertet</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Übertrag der Projektergebnisse in eine skalierte Produktion, um für Folgeprojekte oder andere Anschlussarbeiten auf Systemebene skalierte Materialmengen bereitzustellen</li> </ul> </li> <li>➔ Die Ergebnisse des Projekts bezüglich der Skalierung von Kohlenstoffen sind im Abschlussbericht detailliert dargestellt.</li> </ul>									
Wissenschaftliche Dissemination	<ul style="list-style-type: none"> <li><u>Hoch</u></li> </ul>									

				- Zuarbeit zur wissenschaftlichen Publikationen der Projektpartner							
mittelfristig	Jahr	1	2	3		5					10
Herstellung zyklenstabiler, performanter Li-S Zellen				<ul style="list-style-type: none"> <li>• wegen frühzeitigen Ausstiegs nicht mehr realisierbar</li> <li>- zukünftige Projekte, Verbreiterung der Basis industrieller Partner</li> </ul>							
Erweiterung der Expertise zur LiS-Technologie und Kompetenzentwicklung				<ul style="list-style-type: none"> <li>• wegen frühzeitigen Ausstiegs nicht mehr realisierbar</li> <li>- Zukünftige Drittmittelprojekte, öffentlich und industrie seitig</li> </ul>							
Systementwicklung Li-S als Anschlussprojekt				<ul style="list-style-type: none"> <li>• wegen frühzeitigen Ausstiegs nicht mehr realisierbar</li> <li>- Übertragung der Projektergebnisse in einen skalierten Demonstrator (TRL5-6), Anschlussprojekt oder Arbeit eines Industrie-OEM</li> </ul>							
Erhöhung der Wettbewerbsfähigkeit des Standortes Deutschland für Luft- und Raumfahrtbatteriesysteme und verbundene Industrien (UAV, EVTOL)				<ul style="list-style-type: none"> <li>• wegen frühzeitigen Ausstiegs nicht mehr realisierbar</li> <li>- Marktentwicklung der Kohlenstoffe nach erfolgreicher Systementwicklung</li> </ul>							
Langfristig	Jahr	1	2	3		5					10
UAV oder EVTOL mit Li-S Batteriesystemen				<ul style="list-style-type: none"> <li>• wegen frühzeitigen Ausstiegs nicht mehr realisierbar</li> <li>- Systementwicklung und Qualifizierung nach Luft- und Raumfahrtstandards</li> </ul>							

## 5 Berichtsblatt (Vordruck Nr. 3831)

## Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung)	
	Schlussbericht	
3. Titel		
ALISA - Advanced Lithium-Sulfur batteries with ultramicroporous carbons		
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)]  Lee, Juhani		5. Abschlussdatum des Vorhabens  30.11.2023
		6. Veröffentlichungsdatum  05.12.2023
		7. Form der Publikation  Bericht
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse)  Heraeus Battery Technology GmbH  Reinhard-Heraeus Ring 23  63801 Kleinostheim		9. Ber. Nr. Durchführende Institution
		10. Förderkennzeichen  03XP0504B
		11. Seitenzahl  14
12. Fördernde Institution (Name, Adresse)  Bundesministerium Bildung und Forschung (BMBF)  53170 Bonn		13. Literaturangaben  für  14. Tabellen  2  15. Abbildungen  6
16. Zusätzliche Angaben  Batterien, Kohlenstoffmaterialien, Lithium-Schwefel-Batterie		
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)		

**18. Kurzfassung**

Das ALISA-Projekt zielt darauf ab, die Leistung und Stabilität von Lithium-Schwefel (Li-S) Batterien zu verbessern, indem innovative kohlenstoffhaltige Materialien und verbesserte Elektrolytzusammensetzungen entwickelt werden. Durch die Zusammenarbeit verschiedener Partner werden funktionale Prototypen entwickelt, um das Technologiereife-Level zu erhöhen. Ziel ist es, Herausforderungen wie unzureichende Schwefel-Massenladungen und ungenügende Zellkapazitäten anzugehen. Als Partner im Projekt steuert Heraeus ein innovatives Kohlenstoffmaterial bei, das für den Ionentransport besonders geeignet ist. Obwohl Heraeus vorzeitig aus dem Projekt aussteigen musste, konnten wertvolle Erfahrungen und Fachwissen gewonnen werden, die den verbliebenen Projektpartnern die Fortsetzung des Projekts ermöglichen.

**19. Schlagwörter****20. Verlag****21. Preis****6 Liste der Veröffentlichungen**

In der bisherigen Projektlaufzeit sind keine Veröffentlichungen erfolgt.