

Dresden, 31.03.2026

## Verbundvorhaben H2Giga\_TP\_AEL4GW: AEL-Serienfertigung großskaliger Alkalielektrolyseure – Teilvorhaben: Entwicklung von skalierbaren Elektroden für die alkalische Elektrolyse

### Sachbericht zum Verwendungsnachweis - Teil II: Eingehende Darstellung

---

Stand:	31.03.2026
Einreichungsdatum TIB (Teil I+II):	09.04.2026
Partnerin/Partner:	Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und angewandte Materialforschung (IFAM) – Teilinstitut Dresden
Autorinnen/Autoren:	S. Hilbert, N. Eißmann, L. Heggemann, C. I. Bernäcker
Fördertitel:	Entwicklung von skalierbaren Elektroden für die alkalische Elektrolyse
Laufzeit:	01.10.2021 bis 31.12.2025
Förderkennzeichen:	03HY126B
Disclaimer:	Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

---

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Forschung, Technologie  
und Raumfahrt



Finanziert von der  
Europäischen Union  
NextGenerationEU

## Teil II. Eingehende Darstellung

### 1. Eingehende Darstellung der durchgeführten Arbeiten und Ergebnisse

Das Fraunhofer IFAM testete im Rahmen des AEL4GW-Projekts die Entwicklung und die Skalierung einer vielversprechenden Fertigungsroute von Elektroden für die alkalische Wasserelektrolyse: die pulvermetallurgische Route (PM-Route). Darüber hinaus wird die Optimierung der Stackgeometrie durch Gas-Elektrolyt-Simulationen mit der OpenFOAM-Software vorgestellt. Die Untersuchungen erfolgten in Zusammenarbeit mit Sunfire SE.

Das Fraunhofer IFAM bearbeitete sieben verschiedene wissenschaftlich-technische Arbeitspakete (Abbildung 1). Dabei werden in diesem Bericht die Ergebnisse der AP AEL.1.2.IFAM.3 und AEL.1.2.IFAM.4 in den AP AEL.1.2.IFAM.2 und AP AEL.1.2.IFAM.5 vorgestellt und nicht gesondert aufgeführt. Die Präsentation des AP AEL.1.2.IFAM.6 erfolgt als Teil des AP AEL.1.2.IFAM.5.

		Zeitraum																																																			
		2021				2022				2023				2024				2025																																			
AP	Titel	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4																															
AEL.1.2.IFAM.1	Erstellung Lastenheft	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	
AEL.1.2.IFAM.2	Elektroden-Coating																																																				
AEL.1.2.IFAM.3	Substrat Entwicklung f. Zero-gap-Architektur																																																				
AEL.1.2.IFAM.4	Analytik und Evaluierung der Elektroden																																																				
AEL.1.2.IFAM.5	Aufskalierung der Elektroden																																																				
AEL.1.2.IFAM.6	Test der Elektroden im Stack																																																				
AEL.1.2.IFAM.7	Untersuchung des Blasenverhaltens im Inneren der Zelle																																																				
AEL.3.1	Koordination des Vorhabens AEL - Ready for Gigawatt																																																				
AEL.3.2	Zuarbeit zur Technologieplattform H2Giga																																																				

Abbildung 1: Gantt Chart des AEL4GW-Teilprojekts für das Fraunhofer IFAM (FKZ: 03HY126B).

#### **AP AEL.1.2.IFAM.1: Erstellung Lastenheft**

Ziel dieses Arbeitspakets war die Definition eines Eigenschaftskatalogs für die PM-Elektroden in den unterschiedlichen Skalierungsstufen von Labor- auf Technikum-Maßstab. Das AEL4GW-Elektrodenentwicklung-Projektkonsortium einigte sich auf folgenden Katalog:

- Hohe HER-Aktivität: Zielwert für die Kathoden:  $|\eta_{HER, 600}| < 150 \text{ mV}$  bei der Stromdichte von  $-0.6 \text{ cm}^{-2}$
- Ressourceneffizient → Verzicht auf kostenintensive Platinmetall (PGM)-Materialien → Ni-Elektroden
- Skalierbar auf zwei Skalierungsstufen durch die Verbindung von Segmenten: kreisrunde Elektroden mit  $\varnothing 36.5 \text{ cm}$  und  $\varnothing 150 \text{ cm}$
- Hohe mechanische Stabilität, Duktilität und Handbarkeit der  $\varnothing 36.5 \text{ cm}$ - und  $\varnothing 150 \text{ cm}$ -Elektroden
- Effizientes Gasblasenmanagement bei hohen Stromdichten zwischen  $0,5 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$  und  $1,0 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$

Für die PM-Kathode wählte das AEL4GW-Elektrodenentwicklung-Konsortium basierend auf diesem Eigenschaftskatalog und Literaturrecherchen<sup>[1-6]</sup> folgendes Material:

- Raney-Ni-Mo-Schaum-Elektrode
- Vorteile der einseitigen Beschichtung und des gradierten Aufbaus der Raney-Ni-Mo-beschichteten Elektrode: zero-gap-optimierte Struktur, Reduktion des Materialeinsatzes, verbesserte Duktilität, gesteigerte mechanische Stabilität und effizientes Gasblasenmanagement.

### AP AEL.1.2.IFAM.2+3: Elektroden-Coating + Substrat-Entwicklung für zero-gap-Architektur

Das Fraunhofer IFAM fokussierte sich in diesem AP auf die Entwicklung der PM-Kathoden. Der Herstellungsprozess dieser Elektroden erfolgte in drei Teilschritten und ist in Abbildung 2 dargestellt:

- 1. Ni-Mo-Beschichtung und Sintern:** Zuerst erfolgt die Beschichtung des porösen Ni-Schaums mit einem Ni-Mo-Pulver. Die nachfolgende Sinterung dient zur festen Bindung des Pulvers an das Substrat. Produkt dieses Herstellungsschrittes ist ein Ni-Mo-Schaum (Bearbeitung dieses Schrittes in Zusammenarbeit mit Alantum Europe).
- 2. Al-Beschichtung und Sintern:** Im zweiten Schritt wird der Ni-Mo-Schaum mit Aluminium beschichtet. Anschließend erfolgt eine Sinterung oberhalb der Schmelztemperatur von Al, welches mit den Ni-Mo-Phasen reagiert. Während des Sinterprozesses bilden sich laugbare Ni-Mo-Al-Phasen auf dem Schaumsubstrat, d. h. ein Raney-Ni-Mo-Schaum.
- 3. Laugung:** Im letzten Schritt erfolgt die Laugung des Raney-Ni-Mo-Schaums in einer KOH-Lösung. In diesem Prozess wird Aluminium herausgelöst. Dies führt zu einer porösen Ni-Mo-Beschichtung mit vielen Kanälen. Die gelaugte Elektrode wird anschließend elektrochemisch eingesetzt.

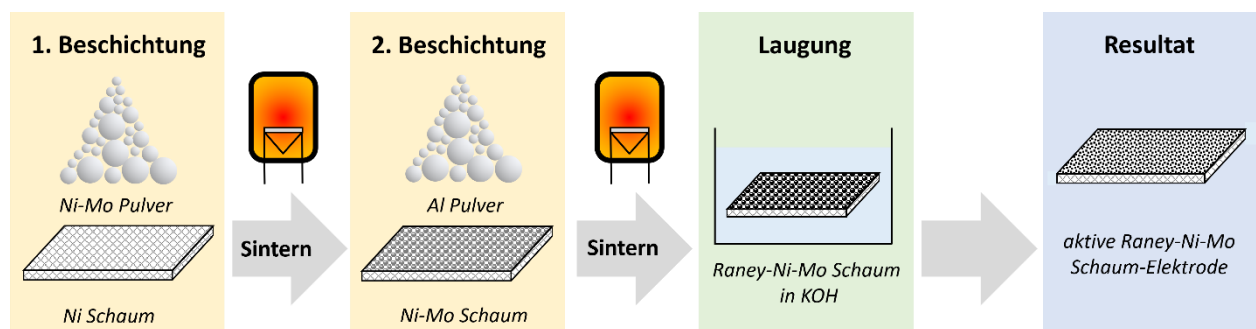


Abbildung 2. Schema der Herstellungsrouten der Raney-Ni-Mo-Schaumelektroden (PM-Elektroden): 1. Beschichtung und Sintern eines Ni-Schaums mit Ni-Mo-Pulver (in enger Zusammenarbeit mit Alantum Europe); 2. Beschichtung und Sintern des Ni-Mo-Schaums mit Al-Pulver und 3. Laugung des Raney-Ni-Mo-Schaums in einer KOH-Lösung.

Im folgenden Abschnitt werden exemplarisch die Strukturen der PM-Elektroden nach den jeweiligen Prozessschritten anhand einer beispielhaften Probe dargestellt. Der Nickelschaum wurde von Alantum Europe zur Verfügung gestellt. Nach dem Aufbringen eines Binders auf den Nickelschaum erfolgt die gleichmäßige Verteilung des Ni-Mo-Pulvers mit > 30 At-% mittels der Alantum-Streutechnik. Die nach der anschließenden Sinterung resultierende Probe wird in Abbildung 3 veranschaulicht. Die Ni-Mo-Beschichtung setzte sich aus einem zweiphasigen Gefüge mit Mo-reichen ( $\approx 60$  At-% Mo) und Mo-armen Phasen ( $\approx 20$  At-% Mo) zusammen. Während der zweiten Beschichtung wird ein Al-Pulver auf dem Ni-Mo-Schaum analog zur ersten Beschichtung aufgebracht. Die nach der anschließenden Sinterung resultierende Probe und ihre Topografie ist in Abbildung 4 dargestellt.

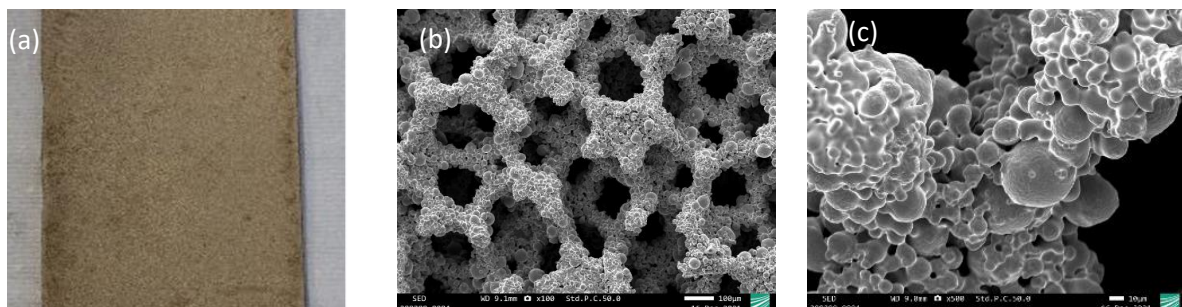


Abbildung 3: (a) Makroaufnahme eines mit Ni-Mo beschichteten Ni-Schaums, (b) und (c) REM-SE-Aufnahmen der Topografie.

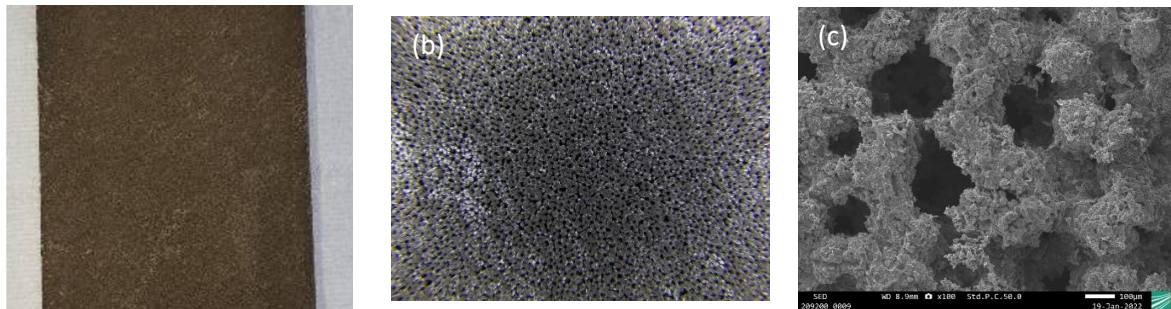


Abbildung 4: (a) Übersichtsaufnahme eines mit Ni-Mo und mit Al beschichteten Ni-Schaums (420 g/m<sup>2</sup>, 450 µm) (b), Detailaufnahme, (c) REM-SE-Aufnahme des Gefüges.

Das Al-Pulver aus der 2. Beschichtung legiert dagegen nur den Ni-Mo-Schaum und nicht den Ni-Ausgangsschaum. Dies ist auf die Abnahme der Porengröße des Nickelschaums durch die erste Beschichtung zurückzuführen. In der Probe bilden sich nach der Al-Beschichtung und der folgenden Sinterung eine Vielzahl an unterschiedlichen Phasen, darunter laugbare binäre und ternäre Ni-Mo-Al-Phasen. Ein Querschliff vom REM-EDX einer Raney-Ni-Mo-Elektrode im gesinterten Zustand nach der Beschichtung mit Al ist in Abbildung 5 (a) mit einem Ausschnitt der Raney-Ni-Mo-Beschichtung dargestellt. Der Schaum ist in drei Bereiche aufgeteilt: oberer Bereich mit Ni-, Mo- und Al-haltigen Phasen, mittlerer Bereich mit Ni- und Mo-haltigen Phasen und unterer Bereich mit Ni-Schaum.

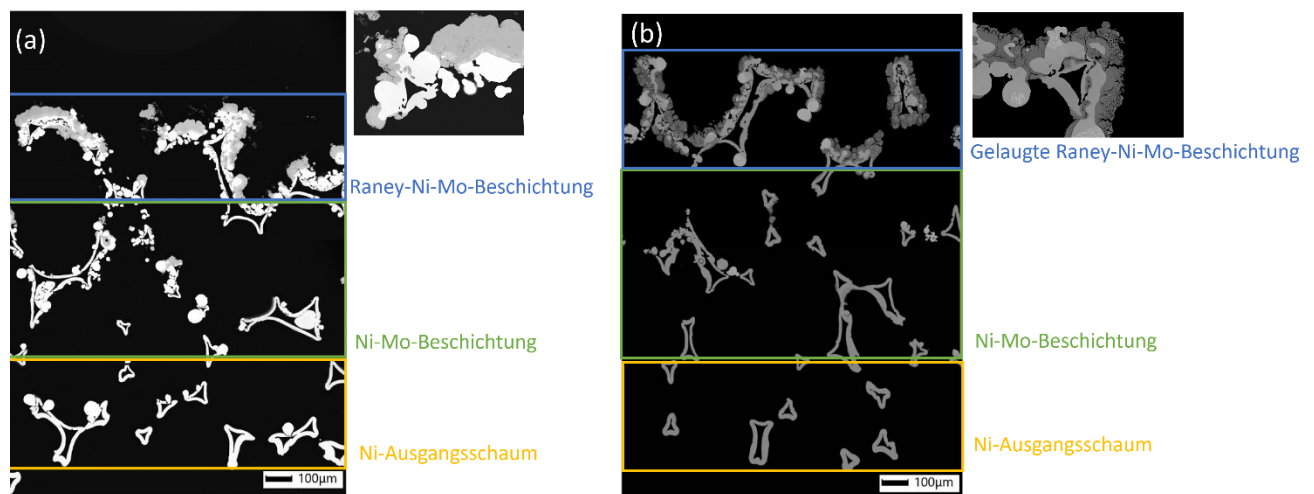


Abbildung 5: Querschliff im REM eines Raney-Ni-Mo-Schaums (a) nach der Beschichtung mit Ni-Mo- und Al-Pulver sowie den folgenden Sinter-Prozessen und (b) im gelaugten Zustand mit einem Ausschnitt der Raney-Ni-Mo-Beschichtung.

Zur Erzeugung einer porösen Raney-Ni-Mo-Beschichtung mit vielen Kanälen dient der Laugungsprozess in einer KOH-Lösung. Abbildung 5(b) mit einem Ausschnitt dieser Beschichtung veranschaulicht, dass die Raney-Ni-Mo-Beschichtung nach der Laugung einen porösen Charakter annimmt. Das Aluminium wurde erfolgreich aus den binären und ternären Ni-Mo-Al-Phasen ausgelaugt. Dies ist an der starken Abnahme des Al-Gehaltes in diesen Phasen von etwa 60 At-% meist auf unter < 10 At-% zu erkennen. Bei den Ni-Mo-haltigen Phasen und beim unbeschichteten Ni-Ausgangsschaum ist keine strukturelle Veränderung nach der Laugung zu erkennen.

Zur Bewertung, wie sich die entwickelte Raney-Ni-Mo-Beschichtung auf die HER-Aktivität der PM-Route auswirkt, wurden mehrere Benchmark-Elektroden mit unterschiedlichen Beschichtungen hergestellt. Eine Übersicht dieser Elektroden wird in Tabelle 1 vorgestellt.

Tabelle 1: Schema der hergestellten Benchmark-Elektroden in der PM-Route mit verschiedenen Beschichtungen, deren Einfluss elektrochemisch analysiert wurde.

	1. Beschichtung mit Ni bzw. mit Ni-Mo	2. Beschichtung mit Al
Mit Mo	Ni-Mo-Schaum	Raney-Ni-Mo-Schaum
Ohne Mo	Ni-Schaum	Raney-Ni-Schaum

In Abbildung 6 und in Tabelle 2 ist der Einfluss der unterschiedlich beschichteten Elektroden aus Tabelle 1 auf die elektrochemische Aktivität dieser Elektroden dargestellt. Je niedriger der Betrag der HER-Überspannung ist, desto besser ist die HER-Aktivität. Die HER-Überspannung des Ni-Schaums und des Ni-Mo-Schaums unterscheiden sich nicht wesentlich. Die HER-Überspannungen  $|\eta_{HER, 500, 5 h}|$  von etwa 350 mV deuten auf eine niedrige HER-Aktivität dieser Proben hin. Eine Beschichtung mit Al und der sich anschließenden Laugung führt zu einer signifikanten Reduktion der HER-Überspannung  $|\eta_{HER, 500, 5 h}|$  zwischen 240 mV und 320 mV. Dies ist vor allem auf die höhere Doppelschichtkapazität der Raney-Ni-Elektroden zurückzuführen: Die Kapazität des Raney-Ni-Schaums beträgt etwa 0,345 F·cm<sup>-2</sup> und des Ni-Schaums 0,004 F·cm<sup>-2</sup>. Dies ergibt einen Rauheitsfaktor  $R_f$  von ungefähr 90 aufgrund der Raney-Ni-Struktur. Darüber hinaus ist das Polarisationsverhalten bei den Raney-Ni-Proben besser als beim Ni-(Mo)-Schaum. Dies spricht für eine gesteigerte intrinsische Aktivität der Raney-Ni-basierten Elektroden. Die HER-Überspannung  $|\eta_{HER, 500, 5 h}|$  ist für die Raney-Ni-Mo-Elektrode trotz der niedrigeren Doppelschichtkapazität um etwa 60 mV geringer als beim Raney-Ni-Schaum. Darüber hinaus veranschaulicht die auf den Rauheitsfaktor normierte Polarisationskurve, dass das Polarisationsverhalten der Raney-Ni-Mo-Elektrode deutlich besser als bei der Raney-Ni-Probe ist (Abbildung 6(c)). Dies lässt auf eine verbesserte intrinsische Aktivität durch die Mo-Zusätze schließen. Die elektrochemischen Analysen demonstrieren, dass die gewählte PM-Route zur Herstellung hochaktiver Kathoden für die alkalische Wasserelektrolyse führt. Darüber hinaus ist noch zu erwähnen, dass der Zielwert  $|\eta_{HER, 600}| < 150$  mV für die Raney-Ni-Mo-Elektroden signifikant unterschritten wird (Tabelle 2).

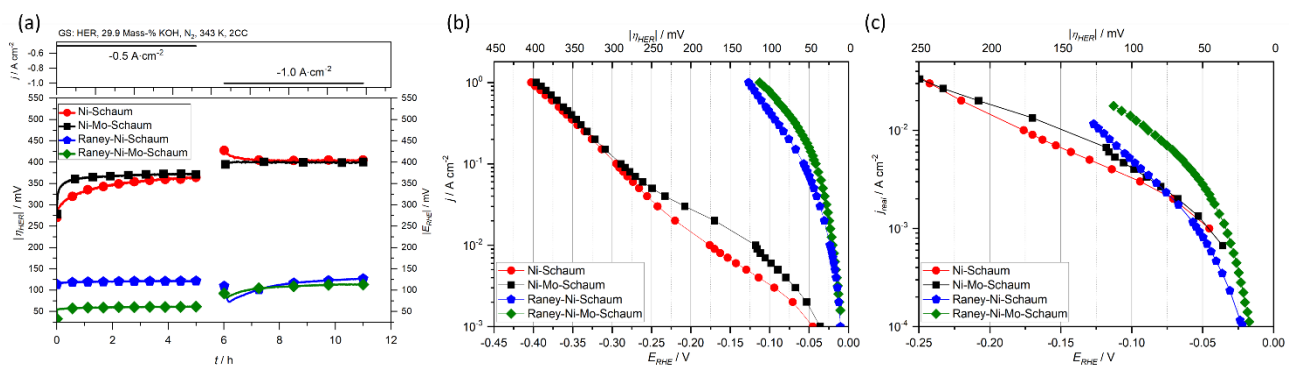
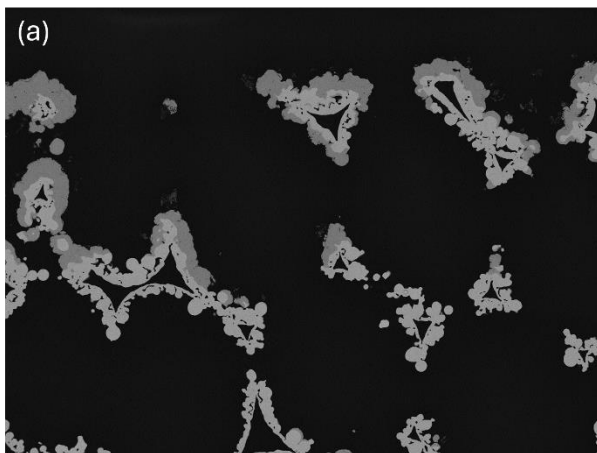


Abbildung 6: (a) HER-Überspannung-Zeit-Kurven, (b) Polarisationskurven, (c) auf den Rauheitsfaktor normierte Polarisationskurve von unterschiedlich beschichteten Elektroden: Ni-Schaum, Ni-Mo-Schaum, Raney-Ni-Schaum und Raney-Ni-Mo-Schaum, 70 °C, 30 Gew-% KOH.

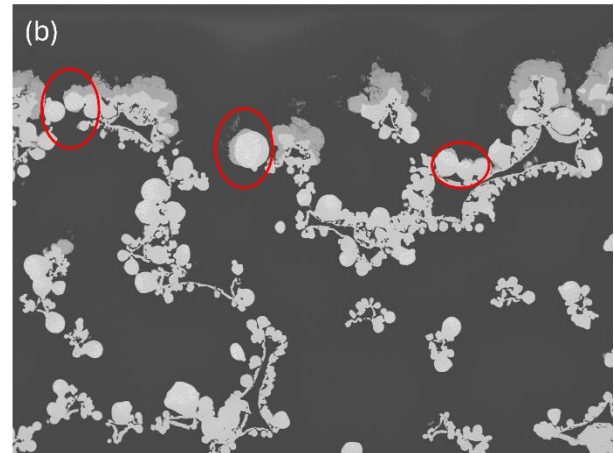
Tabelle 2: HER-Überspannung, Elektrochemische Doppelschichtkapazität  $C_{dl}$  und Rauheitsfaktor  $R_f$  von PM-Elektroden mit verschiedenen Beschichtungen: Ni-Schaum, Ni-Mo-Schaum, Raney-Ni-Schaum und Raney-Ni-Mo-Schaum, 70 °C, 30 Gew-% KOH.

Elektrode	$ \eta_{HER, 500, 5 h} $ / mV	$ \eta_{HER, 1000, 5 h} $ / mV	$C_{dl}$ / F cm <sup>-2</sup>	$R_f$
Ni-Schaum	364	405	0,004	1
Ni-Mo-Schaum	373	400	0,006	1,5
Raney-Ni-Schaum	122	126	0,345	86
Raney-Ni-Mo-Schaum	61	114	0,226	56.5

Zur Erweiterung des Sortiments an Ni-Mo-Pulvermaterialien wurde der Ni-Schaum mit einem anderen Pulver beschichtet. Der Mo-Gehalt in diesem Ni-Mo-Pulver war niedriger als < 30 At.-%. Beim „Standard“-Ni-Mo-Pulver betrug dieser Anteil > 30 At.-%. Darüber hinaus war die Partikelgröße des Mo-armen Ni-Mo-Pulvers feiner als bei der „Standard“-Beschichtung. Der Einfluss der verschiedenen Ni-Mo-Pulvermaterialien auf die Zusammensetzung der Raney-Ni-Mo-Beschichtung wird in Abbildung 7 veranschaulicht. Bei der Elektrode mit einem niedrigem Mo-Gehalt ist das Vorhandensein der Mo-reichen Phase mit den Mo-Anteil von etwa 60 At.-% Mo aus dem Ni-Mo-Steg nicht mehr zu erkennen (siehe rote Kreise in Abbildung 7(b)).



(a) Niedriger Mo-Gehalt und feine Partikel des Ni-Mo-Pulvers



(b) Hoher Mo-Gehalt und grobe Partikel des Ni-Mo-Pulvers

Abbildung 7: Einfluss der unterschiedlichen Ni-Mo-Pulvermaterialien auf die Zusammensetzung der Raney-Ni-Mo-Beschichtung im gesinterten Zustand nach der Al-Beschichtung im REM-Querschliff (Ni-Mo-Phasen mit hohem Mo-Anteil sind mit einem roten Kreis markiert).

Der Einfluss der unterschiedlichen genutzten Ni-Mo-Pulvermaterialien auf die HER-Überspannung-Zeit- und die Polarisationskurven der PM-Kathoden ist in Abbildung 8 dargestellt. Die HER-Überspannungen und das Polarisationsverhalten unterscheiden sich für beide PM-Elektroden nicht wesentlich. Daher ist zu schlussfolgern, dass verschiedene Ni-Mo-Pulvermaterialien für die PM-Elektrodenroute einsetzbar sind.

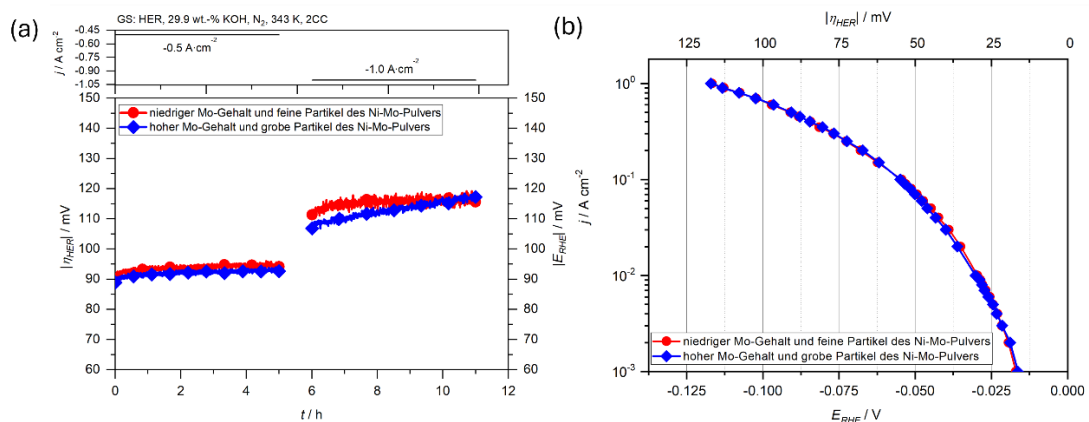


Abbildung 8: Einfluss der Beschichtung mit zwei verschiedenen Ni-Mo-Pulvermaterialien auf die (a) HER-Überspannung-Zeit-Kurven und (b) die Polarisationskurven von zwei PM-Elektroden, 70 °C, 30 Gew.-% KOH.

Die HER-Überspannungen der PM-Elektroden liegen unter den Literaturwerten von anderen Raney-Ni-basierten Elektroden (Tabelle 3). Dies unterstreicht die hohe HER-Aktivität dieser Elektroden.

Tabelle 3: Vergleich der HER-Überspannung der Raney-Ni-Mo-Schaum-Kathoden aus dem AEL4GW-Projekt (fett markiert) mit Werten von Raney-Ni-basierten Elektroden aus der Literatur und den zugehörigen Bedingungen der Messungen in der Literatur.

Substrat	Raney-Ni-System	Beschichtungsprozess	T / K	c(KOH) / Gew-%	j / A·cm <sup>-2</sup>	η <sub>HER</sub>   / mV	Quelle
Perforiertes Ni-Blech	Ni-Mo-Al	VPS	343	25	-1.0	120-140	[3]
Perforiertes Ni-Blech	Ni-Zn	Galvanik	343	25	-0.1	119	[7]
Ni-Folie	Ni-Al	Kaltwalzen	RT	32	-0.1	192	[8]
Ni-Schaum	Ni-Zn	Galvanik	298	30	-0.1	133	[9]
Ni-Platte	Ni-Mo-Al	APS	333	60	-0.4	114	[10]
<b>Ni-Schaum</b>	<b>Ni-Mo-Al</b>	<b>PM</b>	<b>343</b>	<b>30</b>	<b>-0.5</b>	<b>60-95</b>	-

Im einem Laborelektrolyseur in der zero-gap-Anordnung wurde die Zellaktivität der Raney-Ni-Mo-Schaum-Elektrode (10 cm<sup>2</sup> Fläche) als Kathode und als Anode ermittelt. Die Bewertung dieser Aktivität erfolgte anhand an der Zellspannung und den Zellinnenwiderständen. Darüber hinaus wurden die Potentiale der kathodischen und der anodischen Halbzelle mit zwei Referenzelektroden gemessen, um Gasblasentransportprozesse zu analysieren. Durch die Messung dieser Halbzellpotentiale wird die elektrochemische Aktivität dieser Elektroden ermittelt. Die Differenz zwischen der Summe der Halbzellpotentiale und der gemessenen Zellspannung ist auf den Widerstand der gebildeten Gasblasen und den Kontaktwiderstand zurückzuführen. Der Aufbau zur Messung der Halbzellpotentiale ist ähnlich wie bei<sup>[11]</sup>. Neben den PM-Elektroden wurde ein Raney-Ni-beschichtetes 2D-Substrat sowohl als Kathode als auch als Anode im Laborelektrolyseur mit einem UTP500+-Separator untersucht, um den Einfluss der 3D-Schaumstruktur auf die Zellspannung und das Gasblasenmanagement zu veranschaulichen. Die *j-E*-Kurven der Gesamtzelle und der jeweiligen Halbzellen in den Zellmessungen mit dem Raney-Ni-beschichteten Elektroden ist in Abbildung 9 dargestellt. Zusätzlich sind die Zellinnenwiderstände dieser Messungen und die Spannungswerte bei verschiedenen Stromdichten in Tabelle 4 aufgelistet.

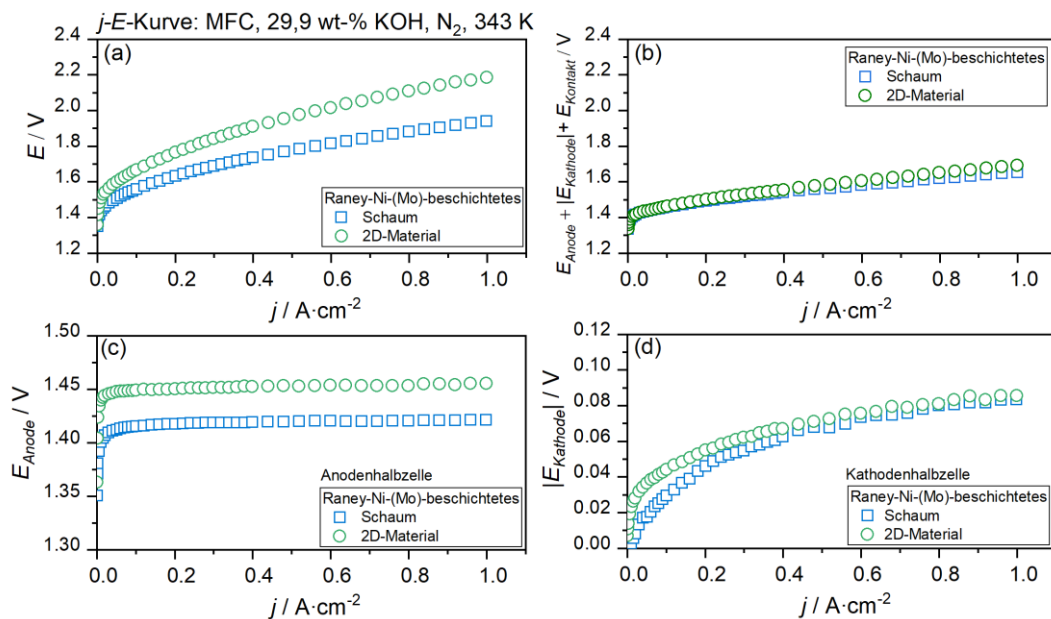


Abbildung 9: *j-E*-Kurven einer Zelle mit den PM-Elektroden als Kathode und als Anode sowie einer Zelle mit Raney-Ni-beschichteten 2D-Substraten als Kathode und als Anode, (a) Gesamtzelle, (b) Summe der anodischen und kathodischen Halbzellspannung und der Spannung durch den verursachten Kontaktwiderstand, (c) anodischer Halbzellraum und (d) kathodischer Halbzellraum, Separator: UTP500+ (Agfa-Gevaert N.V.), 30 Gew-% KOH, 70 °C.

Die kathodische Halbzellspannung zwischen dem Schaums substrat und dem 2D-Material unterscheidet sich nur unwesentlich. Die anodische Halbzellspannung war in der Messung mit dem Schaum um etwa 40 mV geringer. Die elektrochemische Aktivität der Schaum-Elektrode im Laborelektrolyseur ist als Kathode ähnlich und als Anode leicht verbessert. Darüber hinaus ist der Zellinnenwiderstand ohne Gasblasenentwicklung  $R_i$  in der Messung mit der Schaum-Elektrode leicht reduziert. Dies führt zur Schlussfolgerung, dass der Kontaktwiderstand in dieser Messung geringer ist (Tabelle 4).

Die Spannung der Gesamtzelle ist in der Messung mit dem Schaum vor allem im hohem Stromdichtebereich deutlich geringer als in der Messung mit dem 2D-Material, obwohl die Summe der Spannungen der Halbzellen und der Spannung, verursacht durch den Kontaktwiderstand, in diesen Messungen nicht so stark unterscheiden (Abbildung 9(b)). Diese Spannungsdifferenz lässt sich vor allem auf dem reduzierten Zellinnenwiderstand mit Gasblasenentwicklung  $R_{ii}$  um etwa  $0,1 \Omega \cdot \text{cm}^2$  zurückführen. Dies spricht für ein verbessertes Gasblasenmanagement aufgrund der 3D-Struktur des Schaums im Vergleich zum 2D-Substrat.

Tabelle 4: Widerstand ohne Gasblasenentwicklung ( $R_i$ , Bestimmung aus EIS-Messungen) und mit Gasblasenentwicklung ( $R_{ii}$ , Ermittlung aus linearer Regression der j-E-Kurve im hohem Stromdichtebereich zwischen  $0,4 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$  und  $1,0 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$ ) und Zellspannung bei  $0,5 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$  und  $1,0 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$  von der Zellmessung mit den PM-Elektroden als Anode und als Kathode sowie mit Raney-Ni-beschichteten 2D-Substraten als Anode und als Kathode, 30 Gew-% KOH, 70 °C.

Raney-Ni-(Mo)-beschichtetes	$R_i / \Omega \cdot \text{cm}^2$	$R_{ii} / \Omega \cdot \text{cm}^2$	$E (0,5 \text{ Acm}^{-2}) / \text{V}$	$E (1 \text{ Acm}^{-2}) / \text{V}$
Schaum	0,15	0,38	1,73	1,89
2 D-Material	0,19	0,49	1,94	2,16

Tabelle 5 vergleicht die gemessene Zellspannung mit den PM-Elektroden als Kathode und als Anode mit den erzielten Zellspannungen aus der Literatur. Dabei ist zu erkennen, dass die Spannung mit den PM-Elektroden unter oder im Bereich der Werte aus der Literatur liegt. Dies zeigt die hohe Aktivität der PM-Proben in einer Elektrolysezelle.

Tabelle 5: Vergleich der Zellspannungen bei  $0,5 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$  mit den Raney-Ni-Mo-Elektroden (PM-Elektroden) (fett markiert) mit Werten aus Literatur und den zugehörigen Bedingungen der Literaturquellen.

Kathode	Anode	T / K	c(KOH) / Gew-%	$E (0,5 \text{ Acm}^{-2}) / \text{V}$	Quelle
Kommerzielles Ni-Netz	Kommerzielles Ni-Netz	353	30	1,80	[12]
Raney-Ni-Schaum	Ni-Fe-LDH auf Ni-Schaum	353	30	1,75	[13]
Raney-Ni	Raney-Ni-Mo	343	30	1,80	[14]
Raney Ni-Mo	Raney-Ni	353	24	1,75	[15]
<b>Raney-Ni-Mo-Schaum</b>	<b>Raney-Ni-Mo-Schaum</b>	<b>343</b>	<b>30</b>	<b>1,73</b>	-

### AP AEL.1.2.IFAM.5: Aufskalierung der Elektroden

Für die erfolgreiche Herstellung der PM-Elektroden beim Fraunhofer IFAM in der Größe  $\varnothing 36,5 \text{ cm}$  und  $\varnothing 150 \text{ cm}$  war die Etablierung einer zuverlässigen Verbindungstechnik für segmentierte Teile von entscheidender Bedeutung. Diese Technik ermöglicht eine erfolgreiche Verbindung der  $400 \times 400 \text{ mm}$ -gesinterten Fragmente zu diesen skalierten Elektroden. Folgende Verbindungsmethoden wurden getestet (siehe Abbildung 10): Verbindung der Schäume an einer Überlappzone durch Punktschweißen, Verbindung der Schäume durch Anbringen auf einem Träger-Drahtgewebe durch Punktschweißen sowie Verbindung mittels selektivem Elektronenstrahlschmelzen (engl. Selective electron beam melting, Abk.: EBM). Für die Punktschweißexperimente wurde ein Handpunktschweißgerät verwendet.



Abbildung 10: Vorexperimente der Verbindungstechnik zur Herstellung mehrerer PM-Elektroden-Segmente zu einer  $\varnothing 150$  cm Elektrode.

Alle drei Methoden konnten erfolgreich zur Verbindung zweier Proben verwendet werden. Für die Herstellung der  $\varnothing 36,5$  cm- und  $\varnothing 150$  cm-Elektroden wurde das Punktschweißen gewählt, da dieses Verfahren einfach durchzuführen ist. Zudem zeigte sich nach dem Schweißen eine gute mechanische Stabilität der Verbindungszone.

Das AEL4GW-Projektconsortium entschied sich aufgrund der guten Resultate in den elektrochemischen Messungen im Labormaßstab für eine Skalierung der einseitig beschichteten PM-Route auf  $\varnothing 36,5$  cm für den Test im Sunfire-Zdansky-Stack. Im Rahmen dieser Skalierung erfolgte beim Fraunhofer IFAM in Zusammenarbeit mit Alantum Europe die Herstellung von 15 Raney-Ni-Mo-Schaum-Elektroden. Alantum Europe stellte für diesen Versuch Ni-Fe-PFC-Anoden zur Verfügung. Darüber hinaus einigte sich das Konsortium auf eine in-situ-Laugung der skalierten Elektroden im Elektrolyseur von Sunfire.

Die  $\varnothing 36,5$  cm-Kathoden wurden in drei unterschiedlichen Varianten hergestellt, die in Tabelle 6 aufgelistet sind. Die Makrofotos dieser verschiedenen Varianten sind in der Abbildung 11 zu finden.

Tabelle 6: Varianten der  $\varnothing 36,5$  cm -PM-Kathoden für dem Test im Sunfire-Zdansky-Teststand: Dicke, mit/ohne Überlappungszone und Anzahl der Elektroden pro Variante.

Variante	Dicke der Elektrode	Verbindungszone	Anzahl
V1	1,6 mm	nein	5
V2	1,6 mm	ja	5
V3	0,6 mm	ja	5

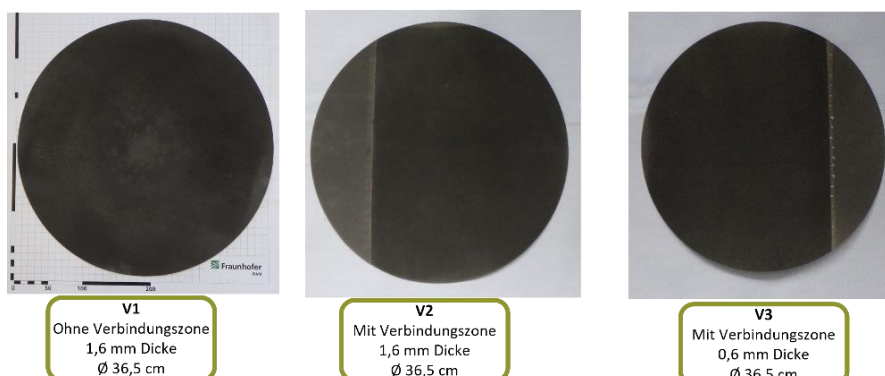


Abbildung 11: Makrofotos der drei verschiedenen Varianten der  $\varnothing 36,5$  cm-PM-Kathoden (Variation der Dicke: 0,6 mm oder 1,6 mm; Variation der Verbindungszone: mit oder ohne Verbindungszone).

Der Unterschied zwischen diesen unterschiedlichen Varianten liegt in der Probendicke sowie im Vorhandensein einer Verbindungszone. Ziel des Stack-Tests dieser Elektroden ist es, neben der Untersuchung der generellen Eignung der PM-Kathoden in diesem Maßstab auch den Einfluss der

Verbindungszone und der Probendicke auf die Zellspannung zu bewerten. Der Einfluss der Verbindungszone auf elektrochemische und mechanische Stabilität ist vor allem für die Herstellung der Ø150 cm-Elektroden vom Interesse, da bei diesem Prozess eine Verbindung von mehreren Fragmenten vorgesehen war. Die Verbindung per Punktschweißung erfolgte nach der Beschichtung mit Al und der folgenden Sinterung. Die mechanische Stabilität dieser Verbindungszone erwies sich als sehr gut. Anschließend wurden die Elektroden per Laserstrahlen auf die finale Form zugeschnitten.

Die Struktur der Beschichtung einer beispielhaften Ø36,5 cm-Elektrode im initialen Zustand, vor dem Einsatz im Stack, wird in einer REM-EDX-Messung in Abbildung 12(a) veranschaulicht. Die erfolgreiche Herstellung der Raney-Ni-Mo-Beschichtung ist an dem Vorhandensein mehrerer laugbarer binärer und ternärer Ni-Mo-Al-Phasen zu erkennen. Darüber hinaus erfolgte noch zusätzlich ein elektrochemisches Qualitätsmanagement in der Drei-Elektroden-Anordnung an Randstücken der Ø36,5 cm-Elektroden (Abbildung 13). Die HER-Überspannungen und die Doppelschichtkapazitäten der Analysenproben der Ø36,5 cm-Elektroden unterscheiden sich nur unwesentlich von den Proben im Labormaßstab und deuten auf eine erfolgreiche Skalierung hin. Nach den erfolgten elektrochemischen und der strukturellen Analysen der Randstücke wurden die Ø36,5 cm-Elektroden zu Sunfire für den Test im Zdansky-Stack versendet. Das Fraunhofer IFAM begleitete das Experiment der Ø36,5 cm-Elektroden.

Nach dem Test im Sunfire-Zdansky-Stack nach über 100 h Betrieb erfolgte an ausgewählten PM-Kathoden beim Fraunhofer IFAM post-operando-Analysen in Form von elektrochemischen und strukturellen Analysen. In Abbildung 12 sind beispielhafte strukturelle Analysen und Makrofotos der Ø36,5 cm-Elektrode im (a) initialen Zustand und (b) post-operando nach dem Einsatz im Sunfire-Zdansky-Stack dargestellt. Eine signifikante Delaminierung der Raney-Ni-Mo-Beschichtung ist dabei nicht zu erkennen. Dies spricht für eine hohe mechanische Stabilität dieser Beschichtung nach einem Test in einem Elektrolyseur unter industriellen Bedingungen.

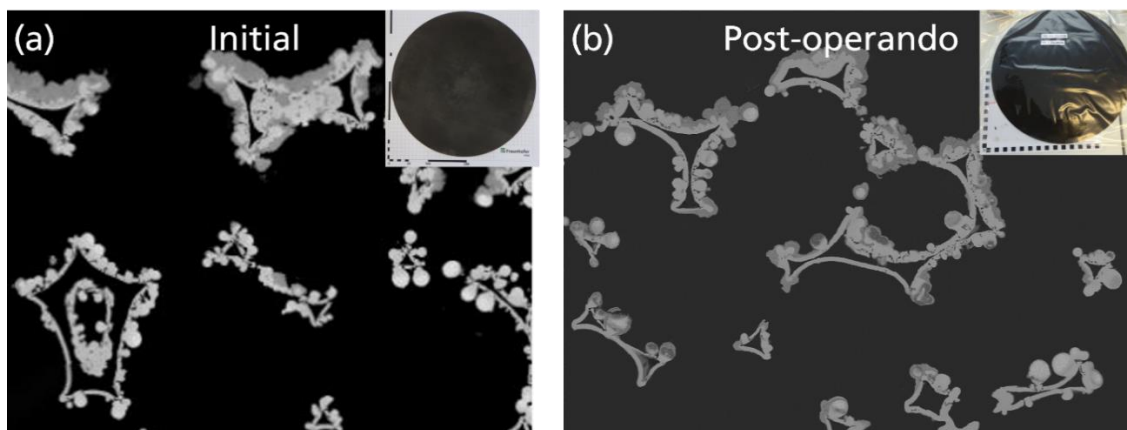


Abbildung 12: Querschliff von Analyseproben von einer beispielhaften Ø36,5 cm-Elektrode im REM-EDX im initialen Zustand und post-operando nach dem Einsatz im Sunfire-Zdansky-Stack im REM.

Darüber hinaus wurden Analyseproben der Ø36,5 cm-Elektrode post-operando bezüglich ihrer elektrochemischen Aktivität in der Drei-Elektroden-Anordnung untersucht (Abbildung 13). Die HER-Überspannung der post-operando-Proben ist bei  $-0,5 \text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}$  leicht niedriger als initialen Zustand und bei  $-1,0 \text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}$  ist dieser Wert nur unwesentlich erhöht im Vergleich zum initialen Zustand. Die Doppelschichtkapazität befindet sich für beide Zustände in einem Bereich. Diese Resultate lassen darauf schließen, dass die elektrochemische Aktivität der Ø36,5 cm-Elektroden beim Experiment im Zdansky-Stack nicht degradierte. Das spricht für eine hohe elektrochemische Stabilität der Ø36,5 cm-Elektroden. Die post-operando-Analysen führen zur Erkenntnis, dass der Test der Ø36,5 cm-Elektroden im Sunfire-Zdansky-Stack erfolgreich verlief.

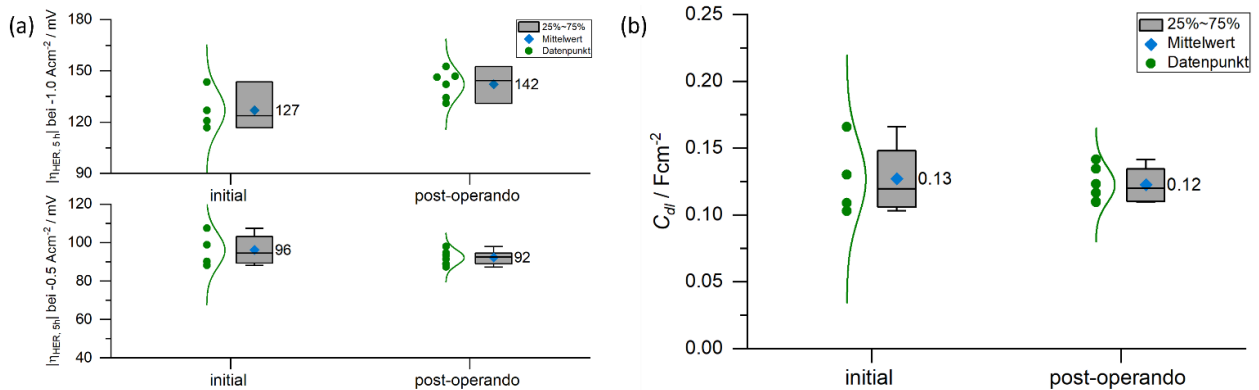


Abbildung 13: Statistische Analyse (Box-Plot) der (a) HER-Überspannungen bei  $-0,5 \text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}$  und bei  $-1,0 \text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}$  und (b) der Doppelschichtkapazitäten von Analysenproben der  $\varnothing 36,5 \text{ cm}$ -Elektroden im initialen Zustand und post-operando nach dem Einsatz im Sunfire-Zdansky-Stack,  $70 \text{ }^\circ\text{C}$  und  $30 \text{ Gew}\text{-}\%$  KOH.

Auf Basis der guten Resultate der  $\varnothing 36,5 \text{ cm}$ -Elektroden erfolgte die Aufskalierung der PM-Route auf  $\varnothing 150 \text{ cm}$  für den Test im Sunfire-Eikoscill-Stack. Im Rahmen dieser Skalierung wurden zwei  $1,6 \text{ mm}$  dicke Kathoden in dieser Größe hergestellt. Alantum lieferte für dieses Experiment zwei Ni-Fe-PFC-Anoden in diesem Maßstab. Die Verbindung der  $\varnothing 150 \text{ cm}$ -Kathoden und  $\varnothing 150 \text{ cm}$ -Anoden erfolgte beim Fraunhofer IFAM. Alle Elektroden wurden auf einem Draht-Trägermaterial verschweißt.

Zur Qualitätssicherung wurden Analyseproben der  $\varnothing 150 \text{ cm}$ -PM-Kathoden elektrochemisch und strukturell charakterisiert. Die Struktur der Beschichtung dieser Elektrode und einer  $\varnothing 36,5 \text{ cm}$ -Probe ist in Abbildung 14 dargestellt. In beiden Skalierungsstufen ist die erfolgreiche Herstellung der Raney-Ni-Mo-Beschichtung auf dem Ni-Schaum zu erkennen. Darüber hinaus wurden Analyseproben der  $\varnothing 150 \text{ cm}$ -PM-Elektroden elektrochemisch in der Drei-Elektroden-Anordnung charakterisiert. Die HER-Überspannung und die Doppelschichtkapazität liegen im Bereich der Laborproben und der  $\varnothing 36,5 \text{ cm}$ -Elektroden (Abbildung 15). Dies zeigt, dass die Skalierung der PM-Route vom Labor- auf das Technikum-Maßstab von  $\varnothing 150 \text{ cm}$  erfolgreich verlief.

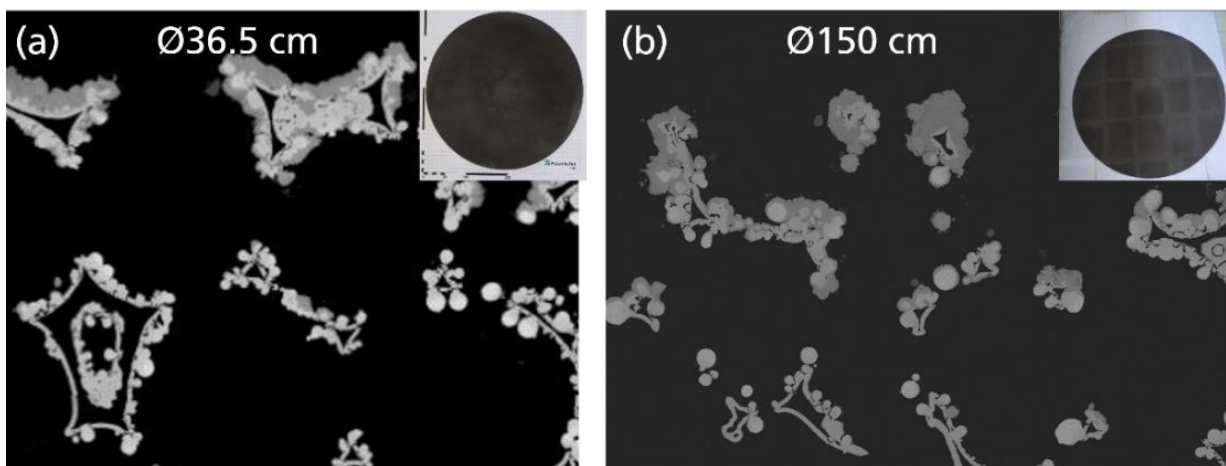


Abbildung 14: Querschliff von Analyseproben von einer beispielhaften  $\varnothing 36,5 \text{ cm}$ -Elektrode und einer  $\varnothing 150 \text{ cm}$ -Kathode im REM-EDX im initialen Zustand vor den Einsätzen in den-Elektrolyseuren von Sunfire im REM.

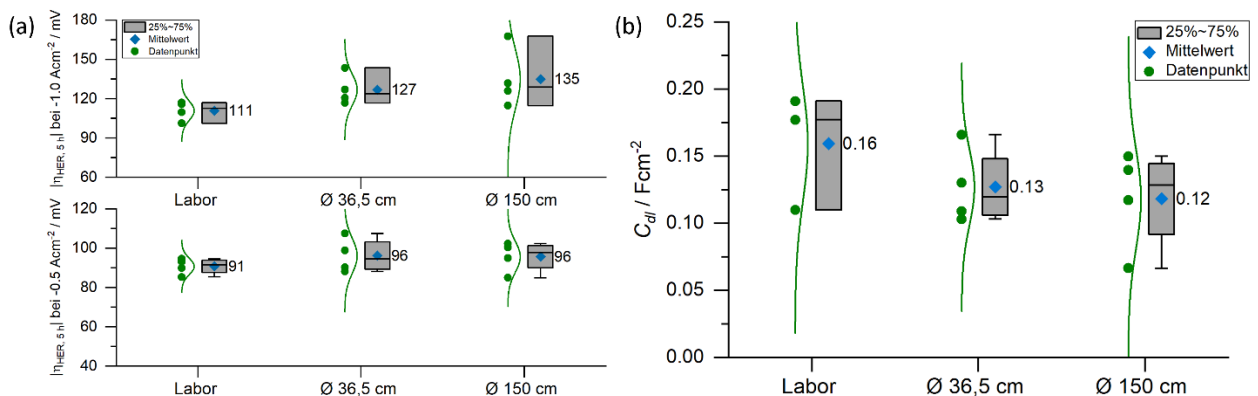


Abbildung 15: Statistische Analyse (Box-Plot) der (a) HER-Überspannungen bei  $-0,5 \text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}$  und bei  $-1,0 \text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}$  und (b) der Doppelschichtkapazitäten von den Laborproben und den Analysenproben der  $\varnothing 36,5 \text{ cm}$ - und der  $\varnothing 150 \text{ cm}$ -Elektroden,  $70 \text{ }^\circ\text{C}$  und  $30 \text{ Gew}\text{-}\%$  KOH.

Des Weiteren wurde im Labor-Elektrolyseur ein Randstück der  $\varnothing 150 \text{ cm}$ -Kathode (Raney-Ni-Mo-Schaum) und der  $\varnothing 150 \text{ cm}$ -Anode (Ni-Fe-PFC), verschweißt auf einem Draht-Trägermaterial, untersucht. Die  $j$ - $E$ -Kurve dieser Zellmessung ist in der Abbildung 16 dargestellt. Die Zellspannung betrug bei  $0,5 \text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}$   $1,73 \text{ V}$  und bei  $1,0 \text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}$   $1,89 \text{ V}$ . Der Vergleich mit den Werten aus Tabelle 5 zeigt, dass sich diese Zellspannungen im Bereich der Laborproben und den Werten aus der Literatur befinden. Diese Messung zeigt ebenfalls, dass die Skalierung der PM-Route erfolgreich verlief.

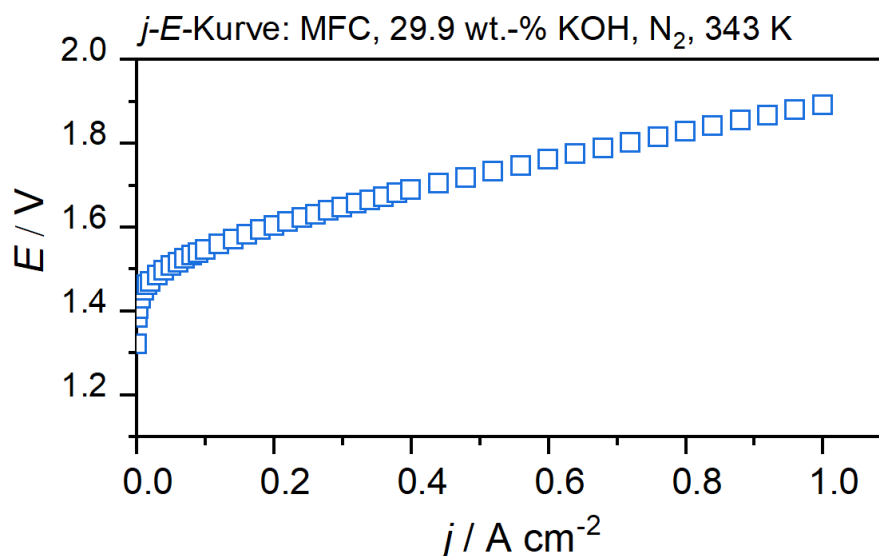


Abbildung 16:  $j$ - $E$ -Kurve einer Zelle mit Analyseproben der  $\varnothing 150 \text{ cm}$ -Kathode und der  $\varnothing 150 \text{ cm}$ -Anode, Separator: UTP500+,  $30 \text{ Gew}\text{-}\%$  KOH,  $70 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Das AEL4GW-Projekt zielte auf die Skalierung einer hochaktiven und ressourceneffizienten Fertigungsroute von Elektroden für die alkalische Wasserelektrolyse ab. Dies wurde erfolgreich mit der Herstellung von zwei Raney-Ni-Mo-Schaum-Elektroden in dem Maßstab von  $\varnothing 150 \text{ cm}$  erfüllt. Diese Route zeichnet sich mehrere Vorteile aus:

- Gute mechanische Stabilität und hohe Duktilität
- Effizientes Gasblasenmanagement durch die offenzellige Schaumstruktur
- Hohe Ressourceneffizienz aufgrund des Verzichtes an Platingruppenmetallen

- Zero-gap-optimierte Struktur und optimierter Materialeinsatz durch die einseitige Beschichtung
- Hohe elektrochemische Aktivität bezüglich der HER  $|\eta_{\text{HER}}| (-0,5 \text{ Acm}^{-2}) < 95 \text{ mV}$
- Hohe Zellaktivität als Kathode und als Anode  $E (0,5 \text{ Acm}^{-2}) < 1,75 \text{ V}$
- Skalierbar

Abbildung 17 veranschaulicht die erfolgreiche Skalierung der PM-Route (Raney-Ni-Mo-Schaum-Elektrode) vom Labor- auf dem Maßstab von  $\varnothing 150 \text{ cm}$ :

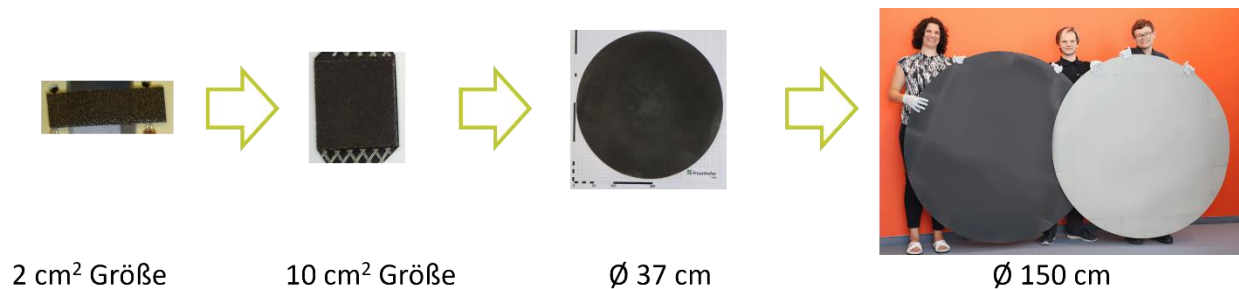


Abbildung 17: Erfolgreiche Skalierung der PM-Route (Raney-Ni-Mo-Schaum) vom Labor- auf Technikum-Maßstab von  $\varnothing 150 \text{ cm}$ .

### **AP AEL.1.2.IFAM.7: Untersuchung des Blasenverhaltens in der Zelle**

In diesem Arbeitspaket waren CFD (Computational Fluid Dynamics) -Simulationen durchzuführen, um ein Verständnis über die dreidimensionale Zweiphasenströmung in der Zelle zu erlangen und daraus strömungstechnische Verbesserungsvorschläge abzuleiten.

#### Problemstellung und Modell-Konzipierung

Die Herausforderung bei der 3D-Modellierung einer alkalischen Elektrolysezelle im industriellen Maßstab besteht in dem vorhandenen Größenskalen-Spektrum, das von der Poren-/Gitterweite der Elektrode ( $\mu\text{m}$ ) bis hin zum Zelldurchmesser (m) reicht. Ein einzelnes Modell kann nicht all diese Größenskalen detailliert abbilden, da dies mit einem enormen Diskretisierungs- bzw. Rechenaufwand verbunden wäre. Es kann entweder ein nur sehr kleiner Elektrodenausschnitt mit aufgelöster Elektrodenstruktur (Mikroskalenmodell) oder ein größerer Zell-Ausschnitt bis hin zur gesamten Zelle modelliert werden, wobei jedoch die Elektrodenstruktur und andere konstruktive Details sowie die disperse Gasblasenströmung selbst (Kontinuumsansatz) vereinfacht bzw. mittels angemessener Modellannahmen und Randbedingungen berücksichtigt werden müssen (Makroskalenmodell).

Gemäß des Arbeitspakets fanden daher zunächst simulative Voruntersuchungen statt, in denen verschiedene Mikroskalen- und Makroskalen-Modellierungsansätze für eine Gasblasen-Elektrolyt-Strömung evaluiert wurden. Dabei wurde eine Mikroskalen-Simulation der Strömung einzelner Gasblasen durch die poröse Elektrodenstruktur aufgrund des enormen Preprocessing- und Simulationsaufwands als unzureichend hinsichtlich der angestrebten Arbeitsziele (Parameterstudien) eingestuft. Eine Makroskalen-Strömungssimulation der gesamten Zelle war dagegen bereits Bestandteil der simulativen Tätigkeiten von Projektpartner Sunfire SE. In enger Absprache mit Sunfire wurde demnach ein Makroskalen-Modell konzipiert, welches einen makroskopischen Ausschnitt aus dem Flowfield einer Sunfire-Zelle abbildet, siehe Abbildung 18. Mit diesem war eine detaillierte Untersuchung der komplexen Zweiphasenströmung durch die dreidimensionale Flowfield-Struktur möglich, siehe Abbildung 19 (Flowfield-Geometrie aus Vertraulichkeitsgründen abgeändert). Weiterhin ließen sich aus den Simulationsergebnissen strömungstechnische Kennzahlen bzw. Korrelationen ableiten, die in die

größerskaligen CFD-Modelle von Sunfire, in welchen die dreidimensionale Flowfield-Struktur geometrisch nicht abgebildet werden kann, integriert werden sollen.

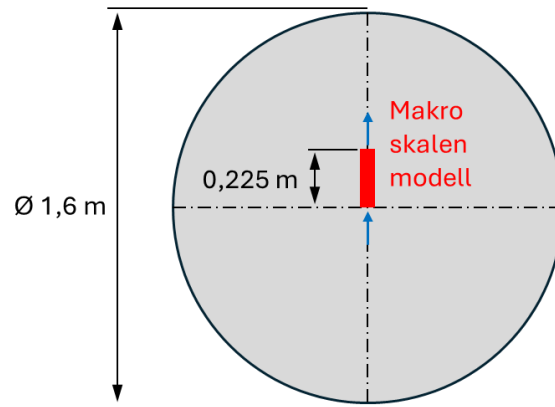


Abbildung 18: Maßstabsgetreue Darstellung des Ausschnittes des CFD-Makroskalenmodells aus der Sunfire-Elektrolysezelle.

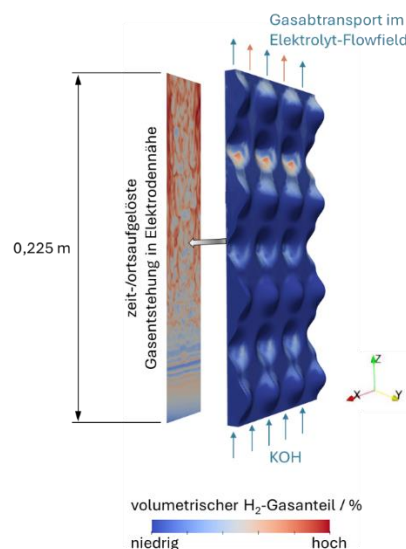


Abbildung 19: Darstellung des Makroskalen-Modells (OpenFOAM) zur Untersuchung der Zweiphasenströmung im Inneren der Zelle (Ersatz-Modell mit aus Vertraulichkeitsgründen abgeänderter Flowfield-Geometrie).

Die Anforderungen an dieses Simulationsmodell sowie die von Sunfire bereitzustellenden Daten für die Modellerstellung und Definition der Randbedingungen wurden in einem Lasten- und Pflichtenheft festgehalten (Erfüllung des MS SI1). Die wesentlichen Punkte daraus lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Aufbau eines Zweiphasen-Strömungsmodells mit Berücksichtigung der aktuellen Sunfire Flowfield-Geometrie, der zeit-/ortsaufgelösten elektrodenseitigen Gasentstehung sowie der Gasblasen-induzierten Turbulenz (Temperaturunterschiede innerhalb des Modell-Kontrollvolumens wurden als vernachlässigbar angesehen, daher isotherme Modellierung),
- Auswahl von (für Druck-Alkali-Elektrolyse) repräsentativen Gasblasendurchmessern, da der Makroskalen-Modellierungsansatz die Vorgabe eines solchen vorsieht,
- Fokus auf den Gasblasenabtransport im freien Flowfield, d.h. Vernachlässigung der Strömung in dreidimensionaler, poröser Elektrode. Stattdessen Verwendung einer dynamischen Randbedingung

zur Abbildung zeit-/ortsaufgelöster elektrodenseitiger Gasentstehung in Abhängigkeit von angelegter Stromdichte und instantaner Gasakkumulation in Elektrodennähe (Gasblockage-Effekt),

- Durchführung von Parameterstudien bzgl. unterschiedlicher Betriebspunkte (Elektrolyt-Volumenstrom, Stromdichte), dagegen keine konstruktiven Modifikationen des Flowfields, da solche von Sunfire in Projekt nicht vorgesehen waren,
- Ableitung von Zweiphasen-Druckverlust-Korrelationen zwecks System-Verständnis und zur Verwendung in größerskaligen Simulationsmodellen (ohne Auflösung der Flowfield-Struktur).

### Ergebnisse

Die CFD-Parameterstudien wurden durch Variation des Elektrolyt-Volumenstroms und der Stromdichte durchgeführt, wobei der untersuchte Parameterraum von Sunfire vorgegeben und während der Projektlaufzeit mehrfach erweitert wurde.

Die Simulationsergebnisse zeigten, dass sich mit höheren Elektrolyt-Volumenströmen sowohl die H<sub>2</sub>-Produktion als auch das Gasblasenmanagement optimieren lassen. Durch sukzessive Volumenstrom-Erhöhung konnte im gesamten Flowfield, insbesondere in Elektrodennähe, eine stetige Abnahme des prozentualen Gasanteils in der Zweiphasenströmung festgestellt werden. Durch die erhöhte Elektrolytgeschwindigkeit bzw. stärkere laterale Auftriebskräfte wurden die Gasblasen stärker von der Elektrode wegbewegt und mit der Elektrolytströmung im Flowfield abtransportiert. Dadurch wird die Elektrode wiederum effektiver mit Elektrolyt umströmt, was die H<sub>2</sub>-Produktivität erhöht.

Zudem war eine Stabilisierung der Strömung in Hauptströmungsrichtung, d.h. weniger starke Verwirbelungen des Elektrolyt-Gas-Gemisches, auszumachen. Durch den höheren Strömungsimpuls des Elektrolyten wurden die Gasblasen stärker von diesem mitgerissen bzw. nahm die Relativgeschwindigkeit zwischen der Gas- und Flüssigkeitsphase stark ab, was mit schwächeren Wechselwirkungen zwischen den zwei Phasen einhergeht. Es konnte auch eine Abnahme der Turbulenz in der Zweiphasenströmung beobachtet werden, was durch eine abgeschwächte bis gar verschwindende Phasen-Wechselwirkung erklärt werden kann.

Auch durch die Analyse der höhenabhängigen Gasentwicklung im Flowfield wurde der effektivere Gasblasenabtransport bei zunehmendem Elektrolyt-Volumenstrom erkennbar. Während bei hohen Volumenströmen der Gasanteil in vertikaler (Hauptströmungs-)Richtung linear anstieg, war bei geringeren Volumenströmen eine Stagnation des Gasanteils ab einer gewissen Höhe zu beobachten. Dies deutet auf einen unzureichenden Gasblasenabtransport bzw. auf eine lokale Gasblasen-Akkumulation, welche die weitere Gasproduktion hemmt, hin.

Eine Erhöhung des Elektrolyt-Volumenstroms geht allerdings auch mit einem erhöhten Druckverlust (Energieverlust) in der Strömung einher, welcher durch die Pumpe kompensiert werden muss. Gerade bei hohen Volumenströmen bestimmt dieser maßgeblich die erforderliche Pumpenleistung (Energiebedarf), da sich ab einem gewissen Volumenstrom der Druckverlust quadratisch proportional zum diesem verhält. Demnach ist die Kenntnis über diesen Strömungsverlust für die Pumpen- bzw. System-Auslegung essenziell, wenngleich er stark von den konstruktiven Gegebenheiten des Strömungskanals abhängt. Die CFD-Simulationen ermöglichten hier eine Charakterisierung der Druckverluste in der Zweiphasenströmung durch das Sunfire-Flowfield. Innerhalb des untersuchten Parameterraums war hierbei jedoch keine quadratische, sondern eine lineare/logarithmische Abhängigkeit des Druckverlusts vom Volumenstrom zu beobachten. Auch dies spricht demnach für die Erhöhung des Elektrolyt-Durchsatzes durch die Zelle.

Bezüglich des Druckverlusts konnte auch eine Abhängigkeit vom Gasanteil ausgemacht werden. Bei konstantem Elektrolyt-Volumenstrom sank dabei der Druckverlust mit zunehmendem Gasanteil in der

Strömung (bzw. mit zunehmender Stromdichte). Dies ist hauptsächlich auf eine abnehmende effektive Dichte des Zweiphasengemisches zurückzuführen, womit der hydrostatische Druck (Schweredruck) in der vertikalen Zellströmung, gegen den die Pumpe arbeiten muss, geringer wird. Ein signifikanter Einfluss des Gasblasen-Auftriebs, welcher die Vertikalgeschwindigkeiten in der Zweiphasenströmung und folglich den Druckverlust zu erhöhen vermag, konnte nicht beobachtet werden. Dies lässt sich damit begründen, dass die im Modell angenommenen Gasblasendurchmesser ( $< 50 \mu\text{m}$ , basierend auf einer Literaturrecherche für druckbeaufschlagte AEL) sehr klein ausfielen und damit der natürliche Gasblasen-Auftrieb relativ zum erzwungenen Transport durch die Elektrolyt-Strömung vernachlässigbar gering war.

Aus den oben beschriebenen Zusammenhängen wurden letztlich mehrdimensionale Druckverlust-Korrelationen abgeleitet und an Sunfire übergeben. Die aufbereiteten Simulationsergebnisse bzw. strömungstechnischen Optimierungsvorschläge stießen bei Sunfire auf positive Resonanz, zumal durch einen regelmäßigen bilateralen Austausch gezielt auf aktuelle Entwicklungsänderungen bzw. Weiterentwicklungen seitens Sunfire eingegangen werden konnte. Damit konnte auch der MS SI2 als abgeschlossen gelten.

In Zusammenarbeit mit Sunfire SE und dem Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf (HZDR) wurde außerdem noch eine Validierung der Zweiphasen-Simulationen angegangen. Hierbei wurde aus Zeit- und Kostengründen auf einen bereits existierenden Versuchsstand zurückgegriffen, welcher dem simulierten Strömungsproblem sehr nahe zu kommen schien. Allerdings stellte sich heraus, dass die im Versuchsstand realisierbaren Volumenströme und Gasblasengrößen um mehrere Größenordnungen über den Parameterwerten des Simulationsmodells lagen, d.h. der Versuchsstand letztlich doch nicht für die Validierung ausgelegt war.

## 2. Darstellung der wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Eine wichtige Position waren Personalkosten. Nach der Genehmigung des Antrags auf die kostenneutrale Projektverlängerung um ein halbes Jahr stimmten die realen Kosten mit den ursprünglich geplanten Kosten überein. Diese Kosten sind auf die Beteiligung von hochqualifizierten Fachkräften an dem AEL4GW-Teilprojekt zurückzuführen. Des Weiteren fielen Materialkosten für die unterschiedlichen Beschichtungen (Ni-Mo und Al), für die Sinterungen, für die Laugungen sowie für die elektrochemischen Analysen an. Eine weitere Position waren Reisekosten zu Projekttreffen des AEL4GW-Teilprojektes und zu den H2Giga-Status-Konferenzen sowie zu Messen. Darüber hinaus wurden Investitionen für einen Sprühbeschichtungsautomaten, für den Erwerb von Lizenzen für die COMSOL-Simulation, für eine leistungsstarke IT-Hardware, für einen großtechnischen Ofen und für einen Potentiostaten getätigt. Diese Investitionen war für die Entwicklung der PM-Elektroden entscheidend. Zusätzlich konnten die Simulationen durch den Erwerb der IT-Hardware und der I-Lizenzen durchgeführt werden.

## 3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten

Die alkalische Wasserelektrolyse (AEL) ermöglicht die chemische Speicherung überschüssiger erneuerbarer Energie, etwa aus Solar- oder Windkraft, in Form von Wasserstoff. Die Entwicklung dieser Technologie ist für den Erfolg der Energiewende bedeutsam. Ein relevanter Faktor für die Kosten eines AEL-Elektrolyseur-Systems sind Elektroden, an denen Wasserstoff und Sauerstoff produziert wird. Um diese Systeme wirtschaftlich erfolgreich verwerten zu können, ist die Entwicklung einer skalierbaren und hochaktiven Elektrodenfertigungsroute von entscheidender Bedeutung<sup>[16]</sup>. Die erfolgreiche Entwicklung der PM-Route mit diesen erfüllten Kriterien zielt auf eine Kostenreduktion von AEL-Elektrolyseuren ab und ist daher eine strategische Investition in den Industriestandort in Deutschland.

Darüber hinaus wurde das Know-How zur Elektrodenentwicklung auf Basis von Struktur-Aktivitäts-Korrelationen sowie zur ambitionierten Skalierung von Labor- auf Technikum-Maßstab umfassend

erweitert. Zudem wurden Kompetenzen zur Simulation von Gasblasentransportprozessen aufgebaut. Diese Kompetenzerweiterung stärkt den Forschungsstandort Deutschland.

Im Rahmen der Entwicklung der PM-Routen wurden im Labormaßstab HER-Überspannungswerte  $|\eta_{HER, 500}| < 95 \text{ mV}$  bei  $-0.5 \text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}$  erzielt. Diese Werte unterstreichen die hervorragende HER-Aktivität dieser Elektrodenroute. Das zentrale HER-Überspannungsziel  $|\eta_{HER, 600}| < 150 \text{ mV}$  wurde für die PM-Elektroden weit unterschritten.

In einem Labor-Elektrolyseur betragen die Zellspannungen bei  $0.5 \text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}$  mit den PM-Elektroden als Kathode und als Anode  $E_{500} < 1,75 \text{ V}$ . Dies führt zur Schlussfolgerung, dass sich die PM-Elektroden neben ihrer hohen HER-Aktivität auch bezüglich ihrer Zellaktivität wegen ihrer zero-gap-optimierten Struktur und ihres effizienten Gasblasenmanagements auszeichnen. Mikrostruktursimulationen der PM-Elektroden zeigten auf, dass das Schaumsubstrat eine hohe Permeabilität aufweist. Dies führt zu einem geringen Druckverlust in der Zelle und wirkt sich so positiv auf die Zellspannung aus.

Die Skalierung der PM-Elektroden von Labormaßstab auf Technikum-Maßstab erfolgte in zwei Skalierungsstufen mit  $\varnothing 36,5 \text{ cm}$  und mit  $\varnothing 150 \text{ cm}$ . Strukturelle und elektrochemische Analysen von Randstücken dieser Proben zeigten die erfolgreiche Beschichtung und Sinterung der PM-Elektroden. Bei diesen Analysenproben wurde eine ähnliche HER-Überspannung wie bei den Laborproben gemessen. Dies zeigt, dass die PM-Route skalierbar ist. Post-operando-Analysen der 365 mm-PM-Elektroden nach dem Einsatz im Sunfire-Zdansky-Stack im Betrieb über 100 h führten zu Schluss, dass die elektrochemische und mechanische Stabilität der Raney-Ni-Beschichtung stabil blieb hat. Dieses Resultat lässt sich auf einen erfolgreichen Test der PM-Elektroden im Zdansky-Stack schließen.

Aufgrund der erfolgreichen Skalierung und dem erfolgreichen Test unter industriellen Bedingungen bewertet das Fraunhofer IFAM die durchgeführten Projektarbeiten für notwendig und angemessen.

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

Ziel dieses Teilvorhabens war die Entwicklung einer ressourcenschonenden, hochaktiven und skalierbaren Elektrodenfertigungsroute auf einem industriellen Maßstab, die den Anforderungen der GW-Elektrolyseur-Industrie entspricht. Diese erfolgreiche Entwicklung ist ein Meilenstein in der industriellen Elektrodenproduktion für die alkalische Wasserelektrolyse und führt langfristig zu einer signifikanten Reduktion der Kosten eines AEL-Elektrolyseur-Systems.

Des Weiteren wurden drei genehmigte Patente von Fraunhofer IFAM in Zusammenarbeit mit Alantum Europe GmbH verfasst. Für diese Patente ist langfristig eine Lizenzvergabe vorgesehen. Das Patent „Elektrode für elektrochemische Zellen“, das Know-How zur Elektrodenskalierung und zu Gasblasen-Simulationen fließen in das beantragte Projekt LaserRodeo im Rahmen des 8. EFP ein.

Die Kompetenzerweiterung zur strukturellen und elektrochemischen Charakterisierung von neuartigen Elektrodensystemen sowie zur Simulation von Gasblasen bildet für Fraunhofer IFAM eine fundamentale Basis für weitere angestrebte öffentliche Projekte, wie etwa das geplante ELKAWE-Projekt. Darüber hinaus erhielt das Fraunhofer IFAM auch Anfragen aus Industrie und Forschung zu Gasblasen-Simulationen sowie zur Entwicklung und zur Skalierung von Raney-Ni-Elektroden. Die Öffentlichkeitsarbeit in Form von Vorträgen und Messeauftritten war dabei wesentlich für die erfolgreiche Verwertung dieser Ergebnisse.

## 5. Während der Durchführung des Vorhabens bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Im Verlauf des AEL4GW-Teilprojekts wurden die Kapazitäten an AEL-Elektrolyseur-Systemen zur Steigerung der H<sub>2</sub>-Produktionskapazitäten signifikant erweitert. Im folgenden Absatz sind exemplarisch drei Projekte aufgeführt, die die gestiegene Nachfrage nach AEL-Elektrolyseuren veranschaulichen.

Nach dem AEL4GW-Projekt sind folgende themenähnliche F&E-Verbundvorhaben zur Entwicklung und zur Skalierung von Elektroden für die alkalische Wasserelektrolyse gestartet:

- Parallel mit dem AEL4GW-Verbundvorhaben startete das Projekt SkalPro aus dem 7. Energieforschungsprogramm. Thema dieses Projekts ist die Entwicklung einer skalierbaren, hochaktiven und kosteneffizienten Raney-Ni-Elektrodenroute für die alkalische Wasserelektrolyse.
- Das Verbundvorhaben E<sup>2</sup>ngel konzentrierte sich auf die Skalierung von leistungssteigernden und hochaktiven Raney-Ni-Elektroden nach einer APS-Beschichtung bis zu einer Fläche von 1055 cm<sup>2</sup>. Die Aktivität wurde abschließend in einem 60-kW-Teststand validiert.
- Im Verbundprojekt AST-AEL wird das Degradationsverhalten von Raney-Ni-Elektroden untersucht. Ziel ist es, die Degradation von Raney-Ni-Proben durch umfassende AST-Experimente zu analysieren und entsprechende Abhilfemaßnahmen abzuleiten.

Im Verlauf des AEL4GW-Teilprojekts wurden die Kapazitäten an AEL-Elektrolyseur-Systemen zur Steigerung der produzierten Wasserstoffmenge signifikant erweitert. Im folgenden Absatz sind exemplarisch drei Projekte aufgeführt, die die zunehmende Nachfrage nach AEL-Elektrolyseuren veranschaulichen:

- Thyssenkrupp nucera erhielt 2022 von Shell einen 200-MW-Großauftrag für das Projekt „Hydrogen Holland I“ am Hafen von Rotterdam. Die Elektrolyseanlage wird Teil einer H<sub>2</sub>-Projektanlage zur grünstoffproduzierenden Industrie- und Verkehrsinfrastruktur und bezieht ihren Strom aus einem Offshore-Windpark.<sup>[17]</sup>
- Uniper beauftragte 2023 Sunfire mit dem Aufbau einer 30-MW-AEL-Anlage im Rahmen des Projekts „Project Air“ in Schweden. Ziel ist die nachhaltige Produktion von Methanol als Basischemikalie für zahlreiche Produkte.<sup>[18]</sup>
- RWE beauftragte Sunfire 2024 mit dem Bau eines 100-MW-Alkali-Elektrolyseurs am Standort Lingen. Dieser gehört zu einer 300-MW-Anlage von RWE und soll bis 2027 fertiggestellt werden; die Anlage soll bis zu 2 Tonnen Wasserstoff pro Stunde produzieren.<sup>[19]</sup>

Die gestiegene Nachfrage nach kostengünstigen Systemen dieser Art verdeutlicht die Notwendigkeit, das Angebot an kostengünstigen und leistungsstarken AEL-Elektroden auszubauen.

Darüber hinaus erfolgte im Berichtszeitraum des AEL4GW-Projekts die Veröffentlichung zahlreicher Publikationen zur Weiterentwicklung und Charakterisierung von Raney-Ni-Elektroden, zu Schaum-Elektroden und zur alkalischen Wasserelektrolyse. Im folgenden Abschnitt werden die wichtigsten Veröffentlichungen präsentiert:

- F. Rocha, R. Delmelle, C. Georgiadis, J. Proost, *J. Environ. Chem. Eng.* **2022**, *10*, 107648-107659.
  - Einfluss der Porengröße und des Elektrolytflusses auf das Gasblasenabfuhr in der AEL
- J.-E. Kim, T.-H. Kim, C.-S. Park, K. Jung, J. Yoon, K.-B. Lee, K.-S. Kang, *Electrochem. Commun.* **2023**, *157*, 107601-107610.
  - Analyse zu verschiedenen AST-Einflussfaktoren auf die OER-Aktivität von Raney-Ni-Elektroden

- M. Demnitz, Y. M. Lamas, R. L. Garcia Barros, A. de Leeuw den Bouter, J. van der Schaaf, M. Theodorus de Groot, *iScience* **2024**, 27, 108695-108712.
  - Verbesserung der HER-, OER-Aktivität und der Zellaktivität von Nickelplatten durch die Zugabe von eisenhaltigen Verbindungen zum KOH-Elektrolyten
- A.-V. Prits, M. Maide, R. Väli, A. Axelrud Nunes, P. Valk, M. Bērziņš, P. Paaver, R. Küngas, J. Nerut, *Int. J. Hydrogen Energy* **2025**, 140, 803.
  - Vorstellung zum Einfluss des Fe-Gehaltes auf die HER- und OER-Aktivität von Raney-Ni-Netzen und Stack-Tests mit Raney-Ni-Netzen
- T. Günther, J. Schick, T. Körner, T. Mangold, R. Weirich, *Int. J. Hydrogen Energy* **2025**, 136, 1124.
  - Untersuchungen zur Abhängigkeit der HER-Aktivität von Raney-Ni-Elektroden von den Bedingungen des Wärmebehandlungsprozesses

## 6. Liste der erfolgten oder geplanten Veröffentlichungen des Ergebnisses nach Nr. 5 der NKBF/NABF

Jahr	Art der Veröffentlichung	Titel, Quelle/Zitat (Journal, Konferenz)	Autoren	Link
2024	Patent DE102022214303 A1	Metallkörper sowie Verfahren zum Herstellen des Metallkörpers	C. I. Bernäcker, T. Büttner, G. Walther, L. Röntzsch, T. Rauscher, S. Loos, N. Eißmann, A. Tillmann, S. Eckstein, S. Amthor, N. Minar	<a href="#">Link</a>
2024	Patent DE102023115632 A1	Elektroden für eine elektrochemische Zelle zur alkalischen Aufspaltung von Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff sowie Verfahren zu deren Herstellung	C. I. Bernäcker, T. Büttner, G. Walther, N. Eißmann, T. Rauscher, S. Loos, A. Tillmann, L- Torkuhl, S. Amthor, N. Minar	<a href="#">Link</a>
2024	Patent DE 10 2023 209 672 B3	Elektrode für elektrochemische Zellen	C. I. Bernäcker, T. Büttner, G. Walther, B. Pham, T. Hutsch, T. Rauscher, N. Eißmann, S. Hilbert, A. Tillmann, S. Amthor, N. Minar	<a href="#">Link</a>
2024	Poster	Entwicklung von skalierbaren Elektroden für die alkalische Elektrolyse (H2Giga-Statuskonferenz)	S. Hilbert; N. Eißmann; L. Heggemann; T. Rauscher; T. Büttner; C. I. Bernäcker; T. Weißgärber	-
2022- 2025	Messe (als Poster)	Hannover-Messe (jährlich stattfindende Veranstaltung)	Fraunhofer IFAM	-
2022- 2025	Messe	Hydrogen Technology Conference & Expo (jährlich stattfindende Veranstaltung)	Fraunhofer IFAM	-
2022- 2025	Workshop	Industrie-Workshop „Advanced Alkaline Electrolysis“ (jährlich stattfindende Veranstaltung)	Fraunhofer IFAM	-
geplant	Publikation	„Scale-up of high-active electrodes for alkaline water electrolysis“	S. Hilbert, N. Eißmann, C. Bernäcker, T. Weißgärber	

## Anlagen zum Schlussbericht

- [1] P. W. Brennecke, H. H. Ewe, *Energy Convers Mgmt* **1991**, 31, 585.
- [2] J. Divisek, B. Steffen, H. Schmitz, *Int. J. Hydrogen Energy* **1994**, 19, 579.
- [3] G. Schiller, R. Henne, V. Borck, *J. Therm. Spray Techn.* **1995**, 4, 185.
- [4] G. V. Golubkova, I. N. Bazanova, V. P. Gostikin, L. G. Nischenkova, O. I. Lomovsky, *React. Kinet. Catal. Lett.* **1999**, 67, 169.
- [5] J.-H. Jeon, J.-E. Kim, T.-H. Kim, C.-S. Park, K. Jung, J. Yoon, J. Kim, Y.-H. Kim, K.-S. Kang, *Electrochem. Commun.* **2024**, 160, 107668.
- [6] C. C. L. McCrory, S. Jung, J. C. Peters, T. F. Jaramillo, *J. Am. Chem. Soc.* **2013**, 135, 16977.
- [7] H.-Y. Chen, G. A. Alexiou, F. Vardalakis, U. Prais, M. Theodorus de Groot, *Int. J. Hydrogen Energy* **2025**, 168, 150941.
- [8] T. Günther, J. Schick, T. Körner, T. Mangold, R. Weihrich, *Int. J. Hydrogen Energy* **2025**, 136, 1124.
- [9] H. Son, H. Lee, J. Lee, T. Han, H. Lee, C.-S. Park, K. Jung, J. Kim, H. W. Jung, K.-S. Kang, *J. Power Sources* **2026**, 661, 238580.
- [10] E. O. Afranie, S. W. Kang, P. M. Bacirhonde, C. H. Park, K. H. Baik, *Energy Fuels* **2025**, 39, 14308.
- [11] N. Guruprasad, J. van der Schaaf, M. T. de Groot, *J. Electrochem. Soc.* **2026**, 173, 34505.
- [12] W. Kuang, Z. Cui, C. Wang, T. Chen, Q. Wang, S. Li, T. Yang, J. Liu, *Adv. Energy Mater.* **2025**, 15, 2406080.
- [13] H. in Lee, M. Mehdi, S. k. Kim, H. S. Cho, M. J. Kim, W. C. Cho, Y. W. Rhee, C. H. Kim, *J. Membrane Sci.* **2020**, 616, 118541.
- [14] F. Razmjooei, T. Liu, D. A. Azevedo, E. Hadjixenophontos, R. Reissner, G. Schiller, S. A. Ansar, K. A. Friedrich, *Sci Rep* **2020**, 10, 10948.
- [15] M. R. Kraglund, M. Carmo, G. Schiller, S. A. Ansar, D. Aili, E. Christensen, J. O. Jensen, *Energy Environ. Sci.* **2019**, 12, 3313.
- [16] M. Holst, S. Aschbrenner, T. Smolinka, C. Voglstätter, G. Grimm, *Cost forecast for low temperature electrolysis – technology driven bottom-up prognosis for PEM and alkaline water electrolysis systems*, **2021**.
- [17] "thyssenkrupp installiert 200 MW Wasserstoffanlage für Shell im Hafen von Rotterdam", zu finden unter <https://www.thyssenkrupp.com/de/newsroom/pressemeldungen/presdetailseite/thyssenkrupp-installiert-200-mw-wasserstoffanlage-fur-shell-im-hafen-von-rotterdam-125811>, **2026**.
- [18] "„Project Air“ in Schweden: Uniper beauftragt 30-MW-Elektrolyseur bei Sunfire", zu finden unter <https://www.uniper.energy/news/de/project-air-in-schweden-uniper-beauftragt-30-mw-elektrolyseur-bei-sunfire>, **2023**.
- [19] "Sunfire baut 100-Megawatt-Elektrolyseur für RWE | Sunfire", zu finden unter <https://sunfire.de/de/news/sunfire-baut-100-megawatt-elektrolyseur-fuer-rwe/#section-1>, **2026**.