

Schlussbericht

zum Projekt

Verbundvorhaben: SkalPro – Skalierbare Produktionsprozesse für hocheffiziente Elektroden in der alkalischen Elektrolyse – Teilvorhaben: Entwicklung eines Elektrolysestacks zur Aufnahme der SkalPro-Elektroden

der Firma Kanadevia Inova BioMethan GmbH

Autoren: Jesper Stumpfe, Jannik Okelmann

Förderkennzeichen: 03EI3052C

Laufzeit: 01.10.2021 – 30.09.2025

Berichtszeitraum: 01.10.2021 – 30.09.2025

Antragsteller:

Kanadevia Inova BioMethan GmbH

Ludwig-Elsbett-Strasse 1
27404 Zeven

Projektleiter: Jesper Stumpfe

Telefon: +49 4281 9876 065

E-Mail: Jesper.Stumpfe@kanadevia-inova.com

Gefördert durch:

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Die Verantwortung für den Inhalt der Veröffentlichungen liegt bei den Autoren.

Inhalt

1	Kurzbericht	1
1.1	Aufgabenstellung	1
1.2	Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	2
1.3	Planung und Ablauf des Vorhabens	2
1.4	Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde	3
1.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	3
2	Eingehende Darstellung	4
2.1	Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele	4
2.2	Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	17
2.3	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten	17
2.4	Voraussichtlicher Nutzen	18
2.5	Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen	18
2.6	Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses nach Nr. 5 der NKBF	19
3	Anlagen zum Schlussbericht	20

Abbildungsverzeichnis

<i>Abbildung 1: Gantt Chart des Verbundvorhabens SkalPro nach erteilter kostenneutraler Verlängerung (FKZ: 03EI3052C) (grün: Zeitraum der kostenneutralen Verlängerung des SkalPro-Projekts).....</i>	<i>3</i>
<i>Abbildung 2: Einfluss der Prozessparametern (Temperatur und Druck) auf die U-I Kurve der Zelle 6.....</i>	<i>8</i>
<i>Abbildung 3: U-I-Kurve nach 27 h (rot)und 51 h (lila) konstantem Betrieb bei 0.5 A/cm² an Zelle 2 aufgenommen im Mini-Stack bei 75°C. Die durchgezogene Line stellt das Herunterrampen auf 0 A/cm² dar und die gestrichelte Linie das Hochrampen auf 0.5 A/cm²</i>	<i>9</i>
<i>Abbildung 4: Schwarze Partikel in der anodischen Halbzelle mit Raney-Ni-Streckgittern.....</i>	<i>9</i>
<i>Abbildung 5: UI-Kurven der über den gesamten Versuchszeitraum in der Technikumsanlage der Zelle 2. Zu sehen ist die Degradation und die extrapolierte Zellspannung für 0,5 A/cm² bei Versuchsbeginn.</i>	<i>12</i>
<i>Abbildung 6: Spannungsverlauf über den gesamten galvanostatischen Versuchszeitraum. Zu sehen ist die schlechtere Zellspannung der Zelle 3 und verstärkte Degradation nach der Systemstörung im rot markierten Bereich.</i>	<i>12</i>
<i>Abbildung 7: Qualitative Abschätzung der Stromkosten, Wartungskosten, Investitionskosten und dem Austausch der Elektroden in Abhängigkeit von den Eingangsparameter</i>	<i>15</i>

Tabellenverzeichnis

<i>Tabelle 1: Zellaufbau des Mini-Stack für die Versuchsreihe in der Laboranlage</i>	<i>6</i>
<i>Tabelle 2: Zellspannungen des Mini-Stacks für 0.3, 0.5 und 1 A/cm². Dazu die berechnete Ohm'sche Widerstand bei 0.5A/cm²</i>	<i>7</i>
<i>Tabelle 3: Zellaufbau des Short-Stack für die Versuchsreihe in der Technikumsanlage</i>	<i>10</i>
<i>Tabelle 4 Übersicht der gewählten Parameter für die Techno-ökonomische Analyse</i>	<i>14</i>
<i>Tabelle 5 Auszug aus dem zahlenmäßigen Nachweis</i>	<i>17</i>
<i>Tabelle 6: Versuchsplan zur strukturierten Abarbeitung der Versuche auf der Laboranlage</i>	<i>21</i>
<i>Tabelle 7: Versuchsplan zur strukturierten Abarbeitung der Versuche auf der Technikumsanlage.</i>	<i>22</i>

1 Kurzbericht

Die globalen und nationalen Klimaziele sowie das prognostizierte Wachstum des Wasserstoffbedarfs erfordern einen massiven Ausbau der Elektrolysekapazitäten. Studien prognostizieren eine jährliche Installationsrate von 1–5 GW AEL-Kapazität allein für Deutschland bis 2030, wodurch die Notwendigkeit kosteneffizienter, robuster und langzeitstabiler Elektroden in den Mittelpunkt rückt. Da die PEM-Technologie aufgrund der kritischen Rohstoffsituation (Iridium) mittelfristig limitiert ist, besitzt die alkalische Elektrolyse ein hohes Potenzial für den industriellen Hochlauf — sofern wesentliche Prozess und Fertigungshürden überwunden werden können.

1.1 Aufgabenstellung

Ziel des Verbundvorhabens SKALPRO ist es, einen neuartigen, skalierbaren Elektrodenfertigungsprozess zu entwickeln, die die Herstellung großflächiger, poröser Raney-Nickel-Elektroden ermöglicht und diese Elektroden hinsichtlich Aktivität, Stabilität und Handhabbarkeit für den industriellen Einsatz qualifiziert.

Kernaufgabe innerhalb von SKALPRO ist die Entwicklung, Herstellung und Systemintegration von Raney-Nickel-basierten Streckmetall-Elektroden, die durch eine neuartige, kontinuierlich skalierbare Prozesskette gefertigt werden und eine deutlich erhöhte Effizienz und Leistungsdichte moderner AEL-Elektrolyseure ermöglichen. Dieses Ziel soll durch die innovative Kombination mehrerer Prozessschritte — Plattieren, Streckmetallformgebung, Diffusionswärmebehandlung und selektives Auslaugen — erreicht werden, wodurch eine fest verankerte, poröse, elektrochemisch hochaktive Raney-Nickel-Schicht entsteht.

Im Vergleich zu herkömmlichen 2D-Elektrodenmaterialien stellen die so erzeugten porösen 3D-Streckmetall-Elektroden eine neue Klasse industriell nutzbarer Elektroden dar, da neben der verbesserten elektrokatalytischen und strömungstechnischen Leistungsfähigkeit insbesondere die Eignung für Zero-Gap-Zellarchitekturen unter Druckbedingungen realisiert werden kann.

Die Arbeitsziele des Verbundvorhabens umfassen im Einzelnen:

- die Entwicklung einer skalierbaren, ressourceneffizienten Prozesskette zur Herstellung von großflächigen Raney-Ni-Elektroden aus Aluminium-plattiertem Nickelband, einschließlich der Optimierung von Auslaugung, Nachbehandlung und Segmentierung
- die elektrochemische Untersuchung der hergestellten Elektroden anhand definierter Leistungskennzahlen (HER/OER-Überspannung, Degradationsrate, dynamisches Verhalten) in einem eigens entwickelten Testprotokoll
- den Aufbau und die Erprobung von Zero-Gap-Testzellen im Labor- und Technikumsmaßstab, einschließlich einer kleinen Laboranlage (max. 200 × 200 mm²) sowie der Anpassung eines großformatigen Druckelektrolyseurs (≈ 1000 × 800 mm²)
- die technisch-ökonomische Bewertung des neuartigen Herstellungsverfahrens hinsichtlich Produktionskosten, Skalierungspotenzial und Eignung für den großtechnischen Einsatz in der industriellen Elektrolyseurproduktion

Das Teilvorhaben der Kanadevia Inova BioMethan GmbH umfasst hierbei die Ableitung technischer Anforderungen, die Entwicklung einer Zero-Gap-Zellarchitektur, deren Erprobung im Labor- und Technikumsmaßstab sowie die Bewertung der neu entwickelten Elektrodenmaterialien unter realen Betriebsbedingungen (Druck, Temperatur, dynamischer Betrieb). Diese Arbeiten sollen sicherstellen, dass die SKALPRO-Elektroden in industriellen AEL-Systemen eingesetzt werden können.

1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das Konsortium bestand aus Projektpartnern, die jeden Schritt des Elektrodenfertigungsprozesses sowie deren Integration in den Elektrolyseprozess abdeckten. Die Herstellung der Elektroden startet mit der Kaltplattierung, gefolgt vom Strecken und Auslaugen. Wickeder Westfalenstahl übernimmt dabei die industrielle Kaltplattierung, während Bender für das Strecken des plattierten Materials verantwortlich ist. Das Fraunhofer-Institut für angewandte Materialwissenschaft entwickelt sowohl das Auslaugungsverfahren als auch die thermische Aktivierung der Elektroden.

Das Teilvorhaben der Qualifizierung der Elektroden stützte sich auf die bei Kanadevia Inova BioMethan vorhandene Expertise im Aufbau und Betrieb von Druck-Elektrolyseuren sowie auf die bestehende Labor- und Technikumsinfrastruktur am Standort Zeven. Diese Rahmenbedingungen ermöglichten sowohl den Aufbau einer Zero-Gap-Zellarchitektur als auch die Integration und Erprobung der von den Verbundpartnern entwickelten und gefertigten Raney-Ni-Streckgitterelektroden. Dank der engen Zusammenarbeit im Konsortium und der umfassenden elektrochemischen und strukturellen Analyse durch das Fraunhofer IFAM konnten geeignete Elektrodenvarianten ausgewählt und in Mini- sowie Short-Stack-Tests validiert werden. Zusätzlich steuerten Wickeder Westfalenstahl, Bender und das Fraunhofer IFAM ihre Expertise in Material- und Fertigungstechnik bei, sodass Proben für die Tests in gleichbleibend hoher Qualität bereitgestellt wurden.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Vorhaben wurde im Zeitraum vom 01.10.2021 bis zum 30.09.2025 durchgeführt (siehe Abbildung 1) und folgte einem schrittweisen Vorgehen, das die Überführung der entwickelten Elektroden vom Labor- in den Technikumsmaßstab ermöglichte. Nach der Anpassung der Laboranlage an den Zero-Gap-Betrieb wurden die von den Verbundpartnern bereitgestellten Elektrodenvarianten zunächst im Mini-Stack untersucht, um ihr Betriebsverhalten unter realitätsnahen Bedingungen zu bewerten. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse bildeten die Grundlage für die Weiterentwicklung und Anpassung der Technikumsanlage, sodass großformatige Elektroden unter stabilen Druck- und Temperaturbedingungen getestet werden konnten. Im finalen Projektschritt erfolgte die systemtechnische Validierung der Elektroden im Short-Stack unter industrienahen Bedingungen. Durch regelmäßige Abstimmungen im Verbund konnten die jeweiligen Erkenntnisse unmittelbar in die folgenden Arbeitsschritte einfließen und eine konsistente Übertragung der Ergebnisse zwischen den Projektphasen sicherstellen.

Zur Umsetzung des Vorhabens war eine kostenneutrale Verlängerung erforderlich, da sich die Bereitstellung des großformatigen Vormaterials verzögerte und zusätzlicher Zeitbedarf für die Vorevaluierung der Elektrodenoptimierung entstand. Darüber hinaus erfolgte während des Projektverlaufs ein Wechsel des Zuwendungsempfängers: Die Hitachi Zosen Inova ETOGAS GmbH verlor ihren zentralen Wissensträger, und aufgrund der angespannten Arbeitsmarktsituation konnte entsprechendes Fachpersonal nicht kurzfristig ersetzt werden. Da bei der Schwesterfirma Hitachi Zosen Inova BioMethan GmbH (heute Kanadevia Inova BioMethan GmbH) bereits Know-how im Bereich Elektrolyse aufgebaut wurde und dort die zukünftige Verwertung der Technologie verankert ist, konnten vorhandene Kapazitäten eingebunden und die Projektverantwortung erfolgreich dorthin übertragen werden. Die organisatorische Abstimmung im Verbund sowie etablierte Kommunikationsstrukturen ermöglichten eine reibungslose Fortführung des Projekts trotz der genannten Änderungen.

2 Eingehende Darstellung

2.1 Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

Kanadevia Inova BioMethan GmbH (ehemals Hitachi Zosen Inova BioMethan GmbH, zuvor Hitachi Zosen Inova ETOGAS GmbH) war im SkalPro-Projekt für die systemtechnische Integration, den Aufbau und den Betrieb der Elektrolyse-Stacks verantwortlich und damit zentral an der Validierung der entwickelten Raney-Ni-Streckgitter-Elektroden beteiligt. Die Arbeiten umfassten Beiträge in den folgenden Arbeitspaketen:

- Definition eines Leistungskatalog der Elektrode (AP 1)
- Elektrochemische Bewertung der Elektroden (AP 3)
- Skalierung des Prozesses auf Technikum Maßstab (AP 5)
- Systemtests Technikum (AP 6)
- Technisch-ökonomische Bewertung des Herstellungsprozesses (AP 7)

Die im Rahmen dieses Berichts dargestellten Ergebnisse werden arbeitspaketspezifisch strukturiert. Der Schwerpunkt der Arbeiten von Kanadevia Inova BioMethan lag auf der Bewertung der Degradationsmechanismen sowie der Validierung der Elektrodenfertigungsprozesskette im realen Stackbetrieb. Dies erforderte die Entwicklung der Zero-Gap-Zellarchitektur, der Integration der SkalPro-Elektroden in einen Mini-Stack sowie einen industriellen Short-Stack unter Druckbedingungen sowie die Anpassung und den Betrieb Labor- und Technikums-Versuchsanlagen.

AP1 Definition des Leistungskatalogs für Streckmetallelektroden

Erwartete Ergebnisse:

- Eigenschaftskatalog Elektroden Material

Wesentliche Ergebnisse:

Im Rahmen von AP 1 wirkte die Kanadevia Inova BioMethan GmbH an der Definition der systemtechnischen Anforderungen an die zu entwickelnden Raney-Ni-Streckgitter-Elektroden mit. Gemeinsam mit den Verbundpartnern wurde ein verbindlicher Leistungskatalog erarbeitet, der sowohl die elektrochemischen Zielgrößen als auch die mechanischen, thermischen und betriebstechnischen Anforderungen für den späteren Einsatz in Mini- und Short-Stacks beschreibt. Die Ergebnisse werden eingehend vom Fraunhofer IFAM präsentiert. Dazu zählten unter anderem Vorgaben zu Kontaktierungsbedingungen, Gasblasenmanagement, geometrischen Randbedingungen, Open-Area-Varianten, Materialdicken sowie Handhabung und die Herstellung der großformatigen Elektroden.

Kanadevia Inova BioMethan brachte dabei gezielt die Perspektive des Systemintegrators ein, um sicherzustellen, dass die im Projekt entwickelten Elektroden nicht nur im Labor funktionieren, sondern auch zuverlässig in druckbeaufschlagten Zero-Gap-Konfigurationen betrieben werden können. Die Anforderungen wurden im engen Austausch mit Wickeder, Bender und Fraunhofer IFAM definiert und dienten als Grundlage für die Entwicklung der Prozessschritte in AP 2 sowie der Skalierung in AP 5. Damit stellte AP 1 einen wesentlichen gemeinschaftlichen Schritt dar, der die systemseitigen und materialtechnischen Zielgrößen des Verbunds

zusammenführte. Im Rahmen dieses Arbeitspakets erfolgte zudem die gemeinsame Festlegung der Elektrodengröße des Laborstacks auf 100 cm².

AP3 Elektrochemische Bewertung der Elektroden

Erwartete Ergebnisse:

- Testprotokoll zur Ermittlung der Kennwerte der Elektrode (Überspannung für die HER und OER)

Wesentliche Ergebnisse:

Im Rahmen von AP 3 leistete die Kanadevia Inova BioMethan GmbH einen kleinen unterstützenden Beitrag zur Ausarbeitung eines anwendungsnahen Testprotokolls für Einzeller-Messungen. Kanadevia Inova BioMethan brachte dabei praktische Betriebserfahrung ein und unterstützte das Fraunhofer IFAM bei der Definition von Testschritten, die typische Belastungen aus dem realen Elektrolysebetrieb abbilden. Zudem wirkte Kanadevia Inova BioMethan punktuell an der Erstellung eines beschleunigten Alterungstests mit.

AP5 Skalierung des Prozesses auf Technikum Maßstab

Erwartete Ergebnisse:

- Strategie zur großtechnischen Produktion von RaneyNi-Elektroden (für AP7)

Wesentliche Ergebnisse:

Kanadevia Inova BioMethan GmbH unterstützte AP 5 nur punktuell und mit geringem zeitlichem Umfang. In AP 5.1 beteiligte sich Kanadevia Inova BioMethan beratend an ersten Konzeptdiskussionen und half bei der Definition praxisrelevanter Parameter für den späteren Elektrodeneinsatz. Zudem wurden interne Abläufe geschaffen, um die gelaugten Elektroden sicher handhaben zu können. Eine operative Beteiligung an den Prozessschritten erfolgte nicht.

AP6 Systemtests Technikum

Erwartete Ergebnisse:

- Optimierte Zellperformance
- Ermitteln der besten Raney-Ni-Probe aus der Laboranlage für die Herstellung in AP5 und zur finalen Testung in der Technikumsanlage
- Bestimmung der Kennzahlen der Elektroden unter verschiedenen Betriebsbedingungen in Labor- und Technikumsanlage

Wesentliche Ergebnisse:

Im Rahmen von AP 6.1 bestand die Aufgabe der Kanadevia Inova BioMethan GmbH in der Entwicklung und konstruktionstechnischen Auslegung einer neuen Zero-Gap-Zellarchitektur, die den Einsatz der im Verbund entwickelten Raney-Ni-Streckgitter-Elektroden unter druckbeaufschlagten Bedingungen ermöglichen sollte. Hierzu gehörten die Definition der Zellgeometrie, die Ausarbeitung eines geeigneten Dichtungskonzepts sowie die Systemintegration von Diaphragmen, Stromverteilern und Kontaktierungselementen.

In AP 6.2 lag der Schwerpunkt auf der Anpassung der Laboranlage, die den Betrieb unter industrierelevanten Bedingungen (10–14 bar, 70–80 °C, 30 wt % KOH) ermöglichen sollte. Dies beinhaltete die Installation sicherheitsrelevanter Komponenten, die Integration von Messtechnik sowie die Vorbereitung eines zuverlässigen Testumfeldes für reproduzierbare Leistungs- und Stabilitätsmessungen. Nach Abschluss der Umbaumaßnahmen

stand eine betriebsbereite Laboranlage zur Verfügung, die die Durchführung der Versuchsreihen in AP 6.3 ermöglichte und eine zentrale Rolle für die systemtechnische Bewertung der SkalPro-Elektroden einnahm.

Im Rahmen von AP 6.3 wurden die von den Verbundpartnern hergestellten SkalPro-Elektroden im Mini-Stack auf der Laboranlage getestet. Dazu wurde ein Stack mit 13 Zellen aufgebaut, bestehend aus SkalPro-Testzellen und einer Referenzzelle mit unbeschichtetem Ni-Streckgitter. Jede Zelle verfügte über eine aktive Fläche von etwa 100 cm² und war in Zero-Gap-Konfiguration mit einem alkalistabilen Diaphragma (Agfa UTP 500) und geeigneten Stromverteilern ausgeführt. Die Kathoden basierten auf Raney-Ni-Streckgittern mit 200 µm Ni-Kernband und 90 µm Al-Auflage und wurden in vier Varianten eingesetzt: V1 und V2 mit 30 % Open Area und SWD×LWD = 2,5×3,8 mm, V3 mit 50 % Open Area bei gleicher Maschengeometrie sowie V4 mit 30 % Open Area und verkürztem SWD×LWD-Verhältnis von 1,5×2,0 mm. Die Anodenseite wurde standardmäßig mit einer industriellen Referenzanode bestückt. Lediglich für die V1 Variante wurde eine Anoden Raney-Ni-Streckgittern 30 % Open Area und SWD×LWD = 2,5×3,8 mm und die Referenzzelle wurde anodenseitig auf Ni-Streckgitter zurückgegriffen. Der detaillierte Zellaufbau für den Mini-Stack ist in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Zellaufbau des Mini-Stack für die Versuchsreihe in der Laboranlage

	Kathode	Diaphragma	Anode
Z1	V1_1. Probe 10-14933_0416	Agfa UTP 500	V1_4. Probe 10-14933_0445
Z2	V1_2. Probe 10-14933_0428	Agfa UTP 500	V1_5. Probe 10-14933_0446
Z3	V1_3. Probe 10-14933_0443	Agfa UTP 500	V1_6. Probe 10-14933_0450
Z4	V2_1. Probe 10-14933_0411	Agfa UTP 500	industrielle Referenzanode
Z5	V2_2. Probe 10-14933_0422	Agfa UTP 500	industrielle Referenzanode
Z6	V2_3. Probe 10-14933_0431	Agfa UTP 500	industrielle Referenzanode
Z7	V3_1. Probe 10-14933_0412	Agfa UTP 500	industrielle Referenzanode
Z8	V3_2. Probe 10-14933_0423	Agfa UTP 500	industrielle Referenzanode
Z9	V3_3. Probe 10-14933_0432	Agfa UTP 500	industrielle Referenzanode
Z10	V4_1. Probe 10-14933_0417	Agfa UTP 500	industrielle Referenzanode
Z11	V4_2. Probe 10-14933_0429	Agfa UTP 500	industrielle Referenzanode
Z12	V4_3. Probe 10-14933_0444	Agfa UTP 500	industrielle Referenzanode
Z13	SkalPro Ni-Streckgitter	Agfa UTP 500	SkalPro Ni-Streckgitter

Der Mini-Stack wurde mit 30 wt % KOH bei Betriebstemperaturen von ca. 70–80 °C und Drücken im Bereich von 10–14 bar betrieben. Die Laboranlage stellte dazu Elektrolytbehälter, Pumpen, Heiz-/Kühlstufen, Messstellen für Druck, Temperatur und Zellspannung sowie die notwendige Sicherheitstechnik bereit. Die Versuche folgten einem abgestimmten Testprotokoll mit U-I-Kennlinien und galvanostatischen Haltephasen. Nach Aufheizen bei

niedriger Last wurden Stromdichten von 0,3, 0,5, 0,75 und 1,0 A/cm² eingestellt. Für ausgewählte Punkte (insbesondere 0,3 und 0,5 A/cm²) wurden längere Haltephasen gefahren, um stationäre Zellspannungen und erste Degradationsindikatoren zu erfassen. In Tabelle 2 sind die gemessenen Zellspannungen der Zellen im Mini-Stack dargestellt.

Tabelle 2: Zellspannungen des Mini-Stacks für 0.3, 0.5 und 1 A/cm². Dazu die berechnete Ohm'sche Widerstand bei 0.5A/cm²

Nr.	Kathode	Anode	0.3 A/cm ²	0.5 A/cm ²	1.0 A/cm ²	
			E (V)	E (V)	R (Ω cm ²)	E (V)
Z1	V1_1. Probe 30 % open area	V1_4. Probe 10-14933_0445	1.7	1.8	0.75	-
Z2	V1_2. Probe 30 % open area	V1_5. Probe 10-14933_0446	1.7	1.9	0.71	2.5
Z3	V1_3. Probe 30 % open area	V1_6. Probe 10-14933_0450	1.8	1.9	0.81	2.5
Z4	V2_1. Probe 30 % open area	industrielle Referenzanode	1.7	1.8	0.60	2.4
Z5	V2_2. Probe 30 % open area	industrielle Referenzanode	1.7	1.8	0.54	2.4
Z6	V2_3. Probe 30 % open area	industrielle Referenzanode	1.7	1.8	0.48	2.4
Z7	V3_1. Probe 50 % open area	industrielle Referenzanode	1.7	1.8	0.54	2.4
Z8	V3_2. Probe 50 % open area	industrielle Referenzanode	1.7	1.8	0.53	2.5
Z9	V3_3. Probe 50 % open area	industrielle Referenzanode	1.7	1.8	0.53	2.4
Z10	V4_1. Probe 30%, SWD	industrielle Referenzanode	1.7	1.8	0.55	2.4
Z11	V4_2. Probe 30%, SWD	industrielle Referenzanode	1.7	1.9	0.59	2.4
Z12	V4_3. Probe 30%, SWD	industrielle Referenzanode	1.8	2.0	0.78	2.7
Z13	SkalPro Ni-standard	SkalPro Ni-standard	2.2	2.2	0.95	-

Während der Kampagne wurden Elektrolytproben gezogen und an das Fraunhofer IFAM zur Analyse (ICP-OES, KOH-Titration) übergeben. Insgesamt wurden im Mini-Stack über eine Dauer >100 h gemessen, inklusive mehrerer Belastungs- und Entlastungszyklen. Die Messergebnisse zeigen, dass die SkalPro-Elektroden im Mini-Stack unter den vorgesehenen Betriebsbedingungen betrieben werden konnten und Zellspannungen im erwarteten Bereich erreichten wurden. Für die Zellen mit SkalPro-Kathoden lagen die Zellspannungen bei 0,3 A/cm² typischerweise bei etwa 1,7–1,8 V und bei 0,5 A/cm² bei etwa 1,8–2,0 V, während die Referenzzelle mit unbeschichtetem Ni-Streckgitter bei rund 2,2 V lag. Die Variation der Open Area (30 % vs. 50 %) und der SWD/LWD-Geometrie führte im Mini-Stack zu vergleichsweise geringen Unterschieden bei mittlerer Zellspannung und Innenwiderstand. Deutlich ausgeprägter war der Einfluss von Kontaktierungsqualität und Anodenausführung. Dies deckt sich mit den von IFAM ermittelten Struktur-Aktivitätskorrelationen und verdeutlicht, dass geometrische Optimierungen im Streckgitter zwar relevant sind, im Stackbetrieb aber durch mechanische und hydrodynamische Effekte überlagert werden.

Im Betrieb traten Spannungsdifferenzen zwischen einzelnen Zellen sowie zeitliche Veränderungen auf, die als Zusammenspiel aus lokalen Temperaturunterschieden, Druck, Gasblasenverteilung und Kontaktbedingungen interpretiert werden (siehe Abbildung 2 und Abbildung 3). Perforationen des Diaphragmas wurden im Mini-Stack nicht beobachtet. Die Elektroden konnten nach Testende mechanisch weitgehend intakt entnommen werden. Es wurden jedoch insbesondere in anodischen Halbzelle der ersten Zellen schwarze Partikel gefunden (siehe Abbildung 4). Post-Mortem-Untersuchungen des Fraunhofer IFAM zeigten in REM/EDX-Analysen, dass es sich überwiegend um Nickel-reiche Fragmente mit geringem Aluminium-Anteil sowie Spuren von Kalium, Chrom und Eisen handelte. Diese Zusammensetzung und Morphologie wurden als Hinweis darauf gewertet, dass es lokal zu einer teilweisen mechanisch-chemischen Ablösung der Raney-Ni-Schicht, vor allem auf der Anodenseite, gekommen ist. In den Querschliffen der Kathoden zeigten sich dagegen überwiegend stabile Schichten mit nur geringfügig reduzierter Dicke nach dem Einsatz. Die HER-Aktivität blieb im post-operando-Zustand in der Regel innerhalb des im Projekt definierten Zielbereichs.

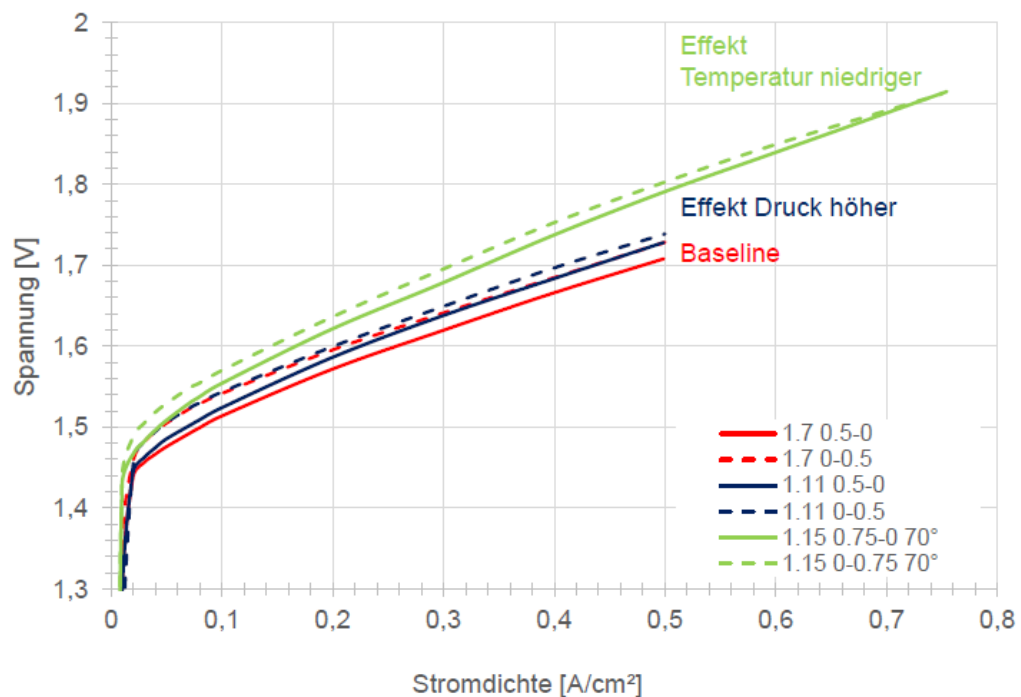


Abbildung 2: Einfluss der Prozessparametern (Temperatur und Druck) auf die U-I Kurve der Zelle 6

Die Laboranalysen zeigten zudem, dass die Membranwiderstände nach dem Einsatz mit SkalPro-Elektroden nicht signifikant anstiegen und sich im Bereich der initialen Werte bewegten. Die Kombination aus Spannungsergebnissen, Elektrolytanalytik (insbesondere erhöhter Aluminiumgehalt in den ersten Betriebstagen) und Partikelbefunden deutet darauf hin, dass ein Teil der Aluminium-haltigen Ni-Al-Phasen im Betrieb weiter ausgelaugt wurde und dabei lokal mechanische Spannungen in der Raney-Ni-Schicht entstanden sind.

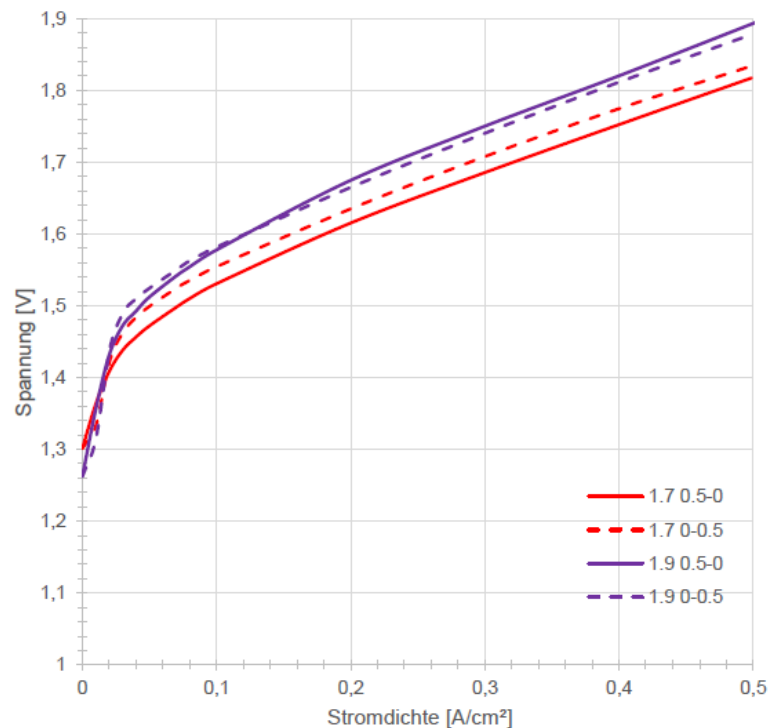


Abbildung 3: U-I-Kurve nach 27 h (rot) und 51 h (lila) konstantem Betrieb bei 0.5 A/cm^2 an Zelle 2 aufgenommen im Mini-Stack bei 75°C . Die durchgezogene Linie stellt das Herunterrampen auf 0 A/cm^2 dar und die gestrichelte Linie das Hochrampen auf 0.5 A/cm^2

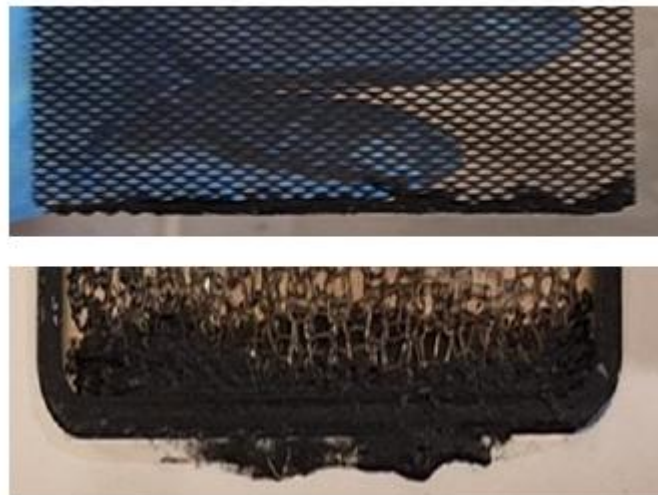


Abbildung 4: Schwarze Partikel in der anodischen Halbzelle mit Raney-Ni-Streckgittern

Insgesamt bestätigten die Mini-Stack-Versuche die grundsätzliche Einsatzfähigkeit der SkalPro-Elektroden im druckbeaufschlagten Zero-Gap-Betrieb, zeigten aber auch frühzeitig potenzielle Risikofelder wie partielle Delamination im Anodenbereich, Sensitivität gegenüber Kontaktierungsparametern und die Bedeutung eines stabilen Elektrolyt- und Temperaturmanagements. Diese Erkenntnisse wurden bei der Auslegung und Betriebsplanung des späteren Short-Stacks in der Technikumsanlage berücksichtigt.

Die Anpassung der Technikumsanlage basierte unmittelbar auf den Erkenntnissen aus den Mini-Stack-Versuchen. Dort hatte sich gezeigt, dass die SkalPro-Elektroden und die Zero-Gap-Konfiguration deutlich sensibel auf Temperatur- und Flussschwankungen sowie auf Kontaktierungsbedingungen reagieren. Außerdem wurde ersichtlich, dass eine Langzeitstudie nur aussagekräftig ist, wenn die Stacktemperatur über die gesamte Betriebsdauer hinreichend stabil gehalten werden kann. Vor diesem Hintergrund wurde im Konsortium entschieden, dass Vorversuche auf mit dem Short Stack durchgeführt werden, um den Einfluss der Anlagenperipherie (Heizleistung, Isolation, Elektrolytführung, Gasmanagement) kontrolliert bewerten zu können.

In AP 6.4 wurden dann die notwendigen Anpassungen an der Technikumsanlage umgesetzt. Zunächst wurde ein Dummy-Stack aus kommerziell erhältlichen Elektroden installiert, um mögliche Limitierungen der Testinfrastruktur bei einem vierzelligen Stacks zu identifizieren. Die Versuche zeigten u. a. eine unzureichende Temperaturstabilität, die sowohl mit der Stromstärke als auch mit der Umgebungstemperatur korrelierte. Daraufhin wurden die Anlage thermisch isoliert, die Heizleistung angepasst und das Elektrolyt- und Temperaturmanagement optimiert, um im späteren Technikumsbetrieb stabile Bedingungen für Langzeitmessungen sicherstellen zu können. Parallel dazu wurden Anpassungen bei Gasführung, Instrumentierung und Sicherheitstechnik vorgenommen, um den sicheren Betrieb mit den großformatigen SkalPro-Elektroden, die aus mehreren Segmenten zusammengesetzt sind, zu ermöglichen. Die in AP 6.4 umgesetzten Maßnahmen schufen damit die Grundlage für die nachfolgende Langzeit-Testkampagne in AP 6.5 und stellen sicher, dass die im Mini-Stack identifizierten Sensitivitäten im Technikums-Masstab hinreichend adressiert werden.

Im Rahmen von AP 6.5 wurde in der Technikumsanlage ein industrieller Short-Stack mit vier Zellen aufgebaut, in dem großformatige SKALPRO-Kathoden unter Druckbedingungen getestet wurden. Die Kathoden basierten auf Raney-Ni-Streckgittern mit etwa 200 µm Ni-Kernband, ca. 90 µm Al-Auflage, 30 % Open Area und einer Maschengometrie von SWD×LWD 2,5×3,8 mm bei einer Streckgitterdicke von etwa 0,8 mm. Als Diaphragma wurde ein alkalistabiles Diaphragma (Agfa UTP 500) eingesetzt. Die Anodenseite wurde mit industriellen Referenzanoden bestückt. Der Stack wurde mit ca. 30 wt % KOH bei Drücken um 14 bar und mittleren Betriebstemperaturen von etwa 75 °C betrieben. Der detaillierte Zellaufbau für den Short-Stack ist in Tabelle 3 dargestellt. Die Anlagen-Peripherie umfasste die Gasabscheider, Pumpen, Heizung/Kühlung, Druck-, Gasqualitäts- und Temperaturmessungen sowie die Erfassung der Einzelzellspannungen.

Tabelle 3: Zellaufbau des Short-Stack für die Versuchsreihe in der Technikumsanlage

	Kathode	Diaphragma	Anode
Z1	Elektrode Nr.2 10-14933_0825	Agfa UTP 500	industrielle Referenzanode
Z2	Elektrode Nr.3 10-14933_0826	Agfa UTP 500	industrielle Referenzanode
Z3	Elektrode Nr.4 10-14933_0827	Agfa UTP 500	industrielle Referenzanode
Z4	Elektrode Nr.5 (Ni) 10-14933_0828	Agfa UTP 500	industrielle Referenzanode

Nach Abschluss der Dichtigkeits- und Druckprüfungen wurde der Stack zunächst ohne angelegte Spannung aufgeheizt, bis die Zieltemperatur erreicht wurde. Anschließend wurde eine galvanostatische Betriebsphase mit konstanter Stromdichte eingeleitet, die es ermöglichen sollte, die Degradation über die Zeit auszuwerten. Insgesamt wurde der Stack über 670 h bei konstanter Last betrieben. In definierten zeitlichen Abständen wurden

U-I-Kennlinien aufgenommen und Elektrolytproben entnommen, um den Verlauf von Zellspannung und Elektrolytcomposition während des Dauerbetriebs zu beobachten.

Im Anschluss an den stationären Betriebsabschnitt wurde ein dynamisches Belastungsprofil begonnen, das sich am „Dynamic Load Degradation Test“ aus den EU „harmonised protocols for testing of low temperature water electrolyzers“ orientierte. [2] Hierbei wurden die Elektroden über rund 160 h mit wechselnden Stromdichten belastet. Aufgrund eines technischen Defekts der Technikumsanlage wurde dieser Versuchsabschnitt nach dem ersten Zyklus abgebrochen. Die Daten der dynamischen Lastwechsel wurden nicht ausgewertet, da unter den gegebenen Umständen eine vollständige Auswertung (inklusive U-I-Kennlinien nach Abschluss des Stressprofils) nicht vorlag. In Absprache mit den Projektpartnern wurde auf ein erneutes Anfahren der Versuche aus zeitlichen Gründen verzichtet, da die Reparatur aufgrund von Lieferzeiten zu viel Zeit in Anspruch genommen hätte und die Auswertung der Überspannungsergebnisse beim IFAM gefährdet hätte.

Die Zellspannungen der SkalPro-Zellen lagen zu Beginn der Dauerbelastung bei $0,3 \text{ A/cm}^2$ im Bereich von etwa $1,8 \text{ V}$. Für $0,5 \text{ A/cm}^2$ wurde eine Zellspannung von ca. $2,0 \text{ V}$ extrapoliert, wobei zwischen den einzelnen Zellen Unterschiede auftraten, wie in Abbildung 5 dargestellt. Eine der Zellen zeigte über den Versuch hinweg höhere Spannungen als die übrigen, was wahrscheinlich auf Unterschiede in Kontaktierung, Elektrodenauflage oder lokale Betriebsbedingungen zurückzuführen ist (siehe Abbildung 6). Über die gesamte Testdauer wurde eine Erhöhung der Zellspannung um etwa 100 mV beobachtet, was etwas einer Degradationsrate von $141 \mu\text{V/h}$ entspricht. Hingegen wurden auch Degradationsraten nach einer ersten großen Degradation, direkt nach Beginn der Versuche, gemessen die deutlich kleiner waren. Diese lagen im Bereich von $13\text{-}43 \mu\text{V/h}$. Die Degradationsrate der Zelle 3 waren hier sogar negativ. Aus den Spannungsverläufen ergibt sich, dass die abzuleitenden Degradationsraten oberhalb der ursprünglich definierten Zielwerte liegen.

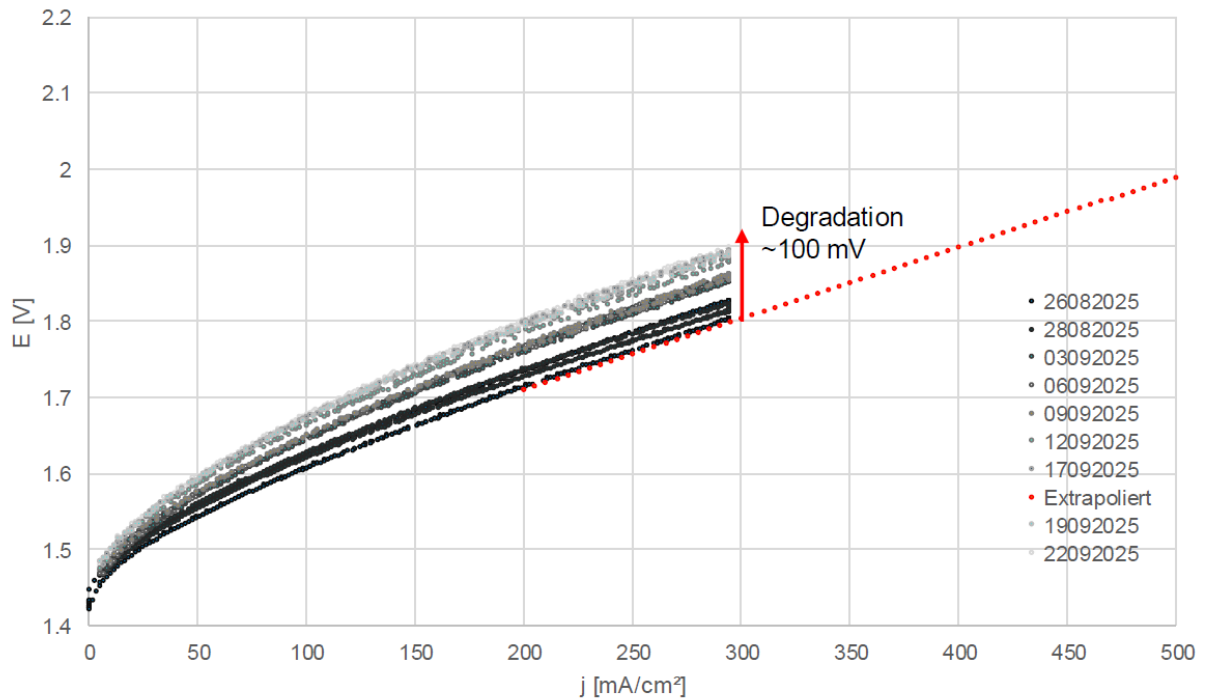


Abbildung 5: UI-Kurven der über den gesamten Versuchszeitraum in der Technikumsanlage der Zelle 2. Zu sehen ist die Degradation und die extrapolierte Zellspannung für $0,5 \text{ A/cm}^2$ bei Versuchsbeginn.

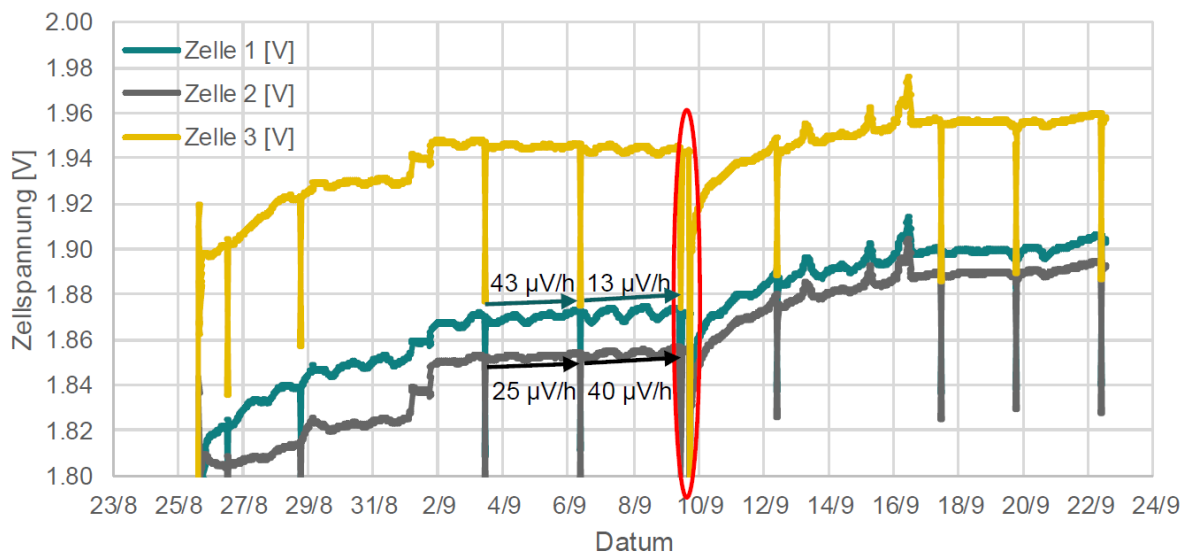


Abbildung 6: Spannungsverlauf über den gesamten galvanostatischen Versuchszeitraum. Zu sehen ist die schlechtere Zellspannung der Zelle 3 und verstärkte Degradation nach der Systemstörung im rot markierten Bereich.

Die Elektrolytanalytik zeigte in den ersten Tagen einen erhöhten Aluminiumgehalt, der im weiteren Verlauf auf einem ungefähr konstanten Niveau blieb, während der Nickelgehalt im Elektrolyten sehr gering war. Dies wurde als Hinweis darauf gewertet, dass Al-haltige Phasen weiter ausgelaugt wurden, ohne dass es zu einer nennenswerten Auflösung der Ni-Matrix kam.

Nach Abschluss der Versuche wurden die Elektroden demontiert und zur Post-Mortem-Analyse an das Fraunhofer IFAM übergeben. Im Vergleich zu den Versuchen auf der Laboranlage trat erneut die schwarze Partikel auf. Diesmal wurden diese jedoch überwiegend in der Stack-Ausgangsleitung gefunden. Auf Anoden- und Kathodenseite selbst wurden nur geringe Partikelrückstände beobachtet. Die relative Partikelmenge war, bezogen auf die deutlich größere Elektrodenfläche im Short-Stack, geringer als im Mini-Stack.

Die Untersuchung der SkalPro-Kathodenrandstücke durch das Fraunhofer IFAM zeigte im Technikum-Maßstab HER-Überpotentiale $\eta_{HER,500h}$ im Bereich von etwa 90–96 mV, womit die zentrale Aktivitätszielgröße ($\eta_{HER,500} < 150$ mV) weiterhin erreicht wurde. Gleichzeitig wurden im Vergleich zu den Mini-Stack-Elektroden vereinzelt Randstücke mit höheren Überspannungen beobachtet, was auf lokale Inhomogenitäten und streuende Qualität einzelner Bereiche hinweist.

Insgesamt bestätigen die Technikumsversuche, dass die SkalPro-Elektroden im Short-Stack unter Druckbedingungen betrieben werden können und Aktivitätswerte im angestrebten Bereich erzielen. Gleichzeitig wurden mehrere Punkte deutlich, die für eine weiterführende Optimierung relevant sind wie die Zellspannungsunterschiede zwischen den Zellen, die Sensitivität gegenüber Temperatur- und Flussführung sowie das wiederholte Auftreten von Partikeln im Elektrolytsystem. Diese Aspekte sollten bei weiteren Arbeiten zur Verbesserung der Langzeitstabilität und der Betriebsführung im Technikums- und industriellen Maßstab adressiert werden.

AP7 Techno-ökonomische Analyse

Erwartete Ergebnisse:

- Material- und Prozessdaten zur späteren Überführung in die reale Fertigung
- Prognose der Prozesskosten

Wesentliche Ergebnisse:

Im Rahmen des Arbeitspakets 7 wurde eine techno-ökonomische Analyse durchgeführt, um die Leistungsfähigkeit und Wirtschaftlichkeit der SkalPro-Kathode in einem alkalischen Elektrolysesystem zu bewerten. Seitens des Fraunhofer IFAM wurden die Kosten der Prozesskosten abgeschätzt. Im Rahmen der Arbeitspakete der Kanadevia Inova BioMethan erfolgte die ökonomische Bewertung der neu entwickelten SkalPro-Elektroden im Kontext einer Gesamtanlage sowie die Identifikation von Optimierungspotenzialen für zukünftige Entwicklungen.

Die Analyse basierte auf der Ermittlung der Wasserstoffgestehungskosten (Levelized Cost of Hydrogen, LCOH) durch eine parametrische Betrachtung, bei der zentrale Eingangsgrößen mittels Minimal- und Maximalannahmen spezifiziert wurden. Die Annahmen beruhen auf experimentellen Ergebnissen aus den Untersuchungen in AP6 und ergänzenden Literaturwerten. Berücksichtigt wurden technische Parameter wie Stromdichte, Zellspannung und Degradationsraten sowie wirtschaftliche Aspekte, darunter Investitionskosten, Betriebskosten und Strompreise. Eine Zusammenfassung der gewählten Parameter ist in Tabelle 4 aufgeführt.

Tabelle 4 Übersicht der gewählten Parameter für die Techno-ökonomische Analyse

Parameter	Min	Max	Einheit	Beleg
Nominale Stromdichte	0,5	0,5	A/cm ²	[3]
Spannung BoL	1,8	1,8	V	[3]
Spezifische Leistung	9,25	9,25	kW/m ²	
Degradation	17	141	µV/h	
Shut-Off Voltage	2,2	2,2	V	
Elektrodenoberfläche	8000	8000	cm ²	
Kosten Kathode	250	800	€/m ²	
Leistungsspezifische Kosten Kathode	28	89	€/kW	
Kosten Stack exklusiv Cathode	375	375	€/kW	[3] & [4]
Physische Komponenten BoP	700	700	€/kW	[4]
Indirekte Kosten	1920	1920		[4]
Lebensdauer der Anlage	20	20	Jahre	
Stunden pro Jahr	5840	5840	h	[4]
Stromkosten	92	92	€/MWh	[4]
Anzahl der Zellen	116	116		[4]
Wartung und Instandhaltung	3.4	3.4	%CAPEX/Jahr	[4]
Kosten für den Tausch der Kathode	43200	94240	€/Tausch	

Die experimentellen Untersuchungen am Mini-Stack lieferten vielversprechende Resultate: Es konnten bis zu einer Stromdichte von 0,5 A/cm² stabile und vergleichsweise niedrige Zellspannungen erzielt werden. Die ermittelte BoL-Zellspannung von 1,8 V diente als Grundlage für die techno-ökonomische Analyse. Zusätzlich wurde eine maximale Zellspannung von 2,2 V angesetzt. Bei Erreichen dieses Werts ist ein Austausch der Elektroden erforderlich. Die Kosten hierfür wurden pauschal mit 20.000 € für Arbeitsaufwand und Material sowie den spezifischen Materialkosten für die Kathoden veranschlagt.

Für die Sensitivitätsanalyse wurden sowohl die Degradationsraten als auch die Elektrodenkosten variiert. Die Degradationsraten stellt dabei einen wesentlichen Unsicherheitsfaktor dar, da die Langzeittests zu sehr un stetigen Degradationsraten führten. Für die technoökonomische Analyse wurden zwei Extrema in den Degradationsraten herangezogen, der Mittelwert aller Zellen im Zeitbereich von 3.9.25 bis 9.9.25 (17 µV/h) und der von Zelle 2 über den gesamten Versuchszeitraum auf der Technikumsanlage (141 µV/h). Für die Elektrodenkosten wurde der vom IFAM bestimmte Kostenbereich von 250 bis 800€/m² angenommen.

Die zusammengefassten Ergebnisse sind in Abbildung 7 dargestellt. Da zahlreiche Abschätzungen und unterschiedliche Quellen einbezogen wurden, bestehen erhebliche Abhängigkeiten insbesondere von

Strompreisen und Gesamt-Investitionskosten, sodass die quantitativen Aussagen nur begrenzt belastbar sind. Dennoch lassen sich aus der qualitativen Analyse mehrere zentrale Effekte ableiten.

Die Stromkosten bilden den größten Anteil an den Gesamtkosten. Sie bleiben in beiden untersuchten Szenarien aufgrund einer durchschnittlichen Zellspannung von 2 V konstant. Die untersuchten Elektroden bewegen sich damit im Vergleich zu derzeit verfügbaren Lösungen in einem wettbewerbsfähigen Bereich. Die Investitionskosten der Kathode tragen einen relevanten, jedoch begrenzten Teil zu den Gesamtinvestitionskosten der Anlage bei. Eine Reduktion der Kathodenkosten führt zwar zu Verbesserungen bei den Wasserstoffgestehungskosten (LCOH), stellt jedoch lediglich einen Baustein für die Verbesserung der Gesamtökonomie des Systems dar.

Die Elektroden-Degradation weist einen entscheidenden Einflussfaktor auf. Hohe Degradationsraten können zu häufigen Austauschzyklen führen, was die Wirtschaftlichkeit signifikant beeinträchtigt. Hinsichtlich langlebigerer Materialien und stabilerer Elektrodenstrukturen besteht daher erhebliches Optimierungspotenzial. Dieser Aspekt war im aktuellen Projekt nicht zentraler Fokus, liefert jedoch wertvolle Ansatzpunkte für nachfolgende Forschungsarbeiten. Beispielsweise zeigte sich in den Versuchen aus AP6, dass insbesondere Abschaltvorgänge einen erheblichen Einfluss auf die Elektrodenperformance aufweisen.

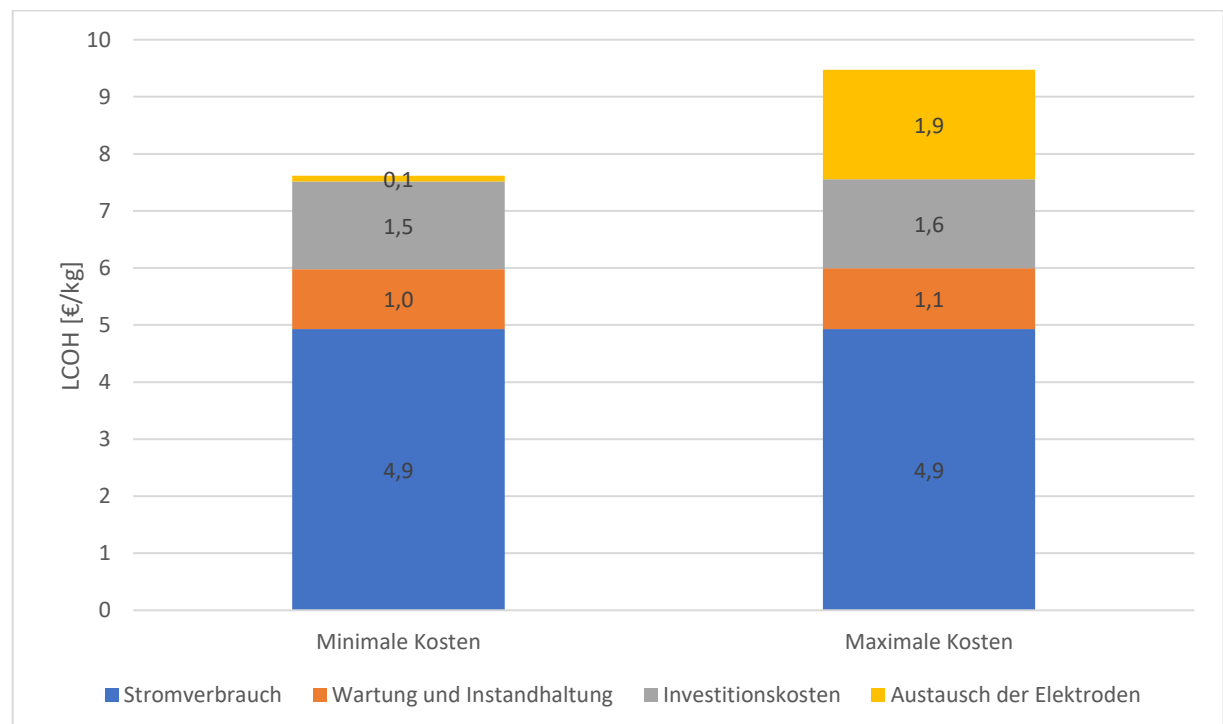


Abbildung 7: Qualitative Abschätzung der Stromkosten, Wartungskosten, Investitionskosten und dem Austausch der Elektroden in Abhängigkeit von den Eingangsparameter

Fazit

Im Rahmen des Verbundvorhabens SkalPro setzte die Kanadevia Inova BioMethan GmbH die gewährten Fördermittel zur Durchführung aller systemtechnischen Validierungsaufgaben ein, wie sie im Arbeitsplan definiert waren. Dies umfasste die Vorbereitung, Anpassung und den Betrieb des eigenen Minis-Stack- und Technikum-Elektrolyseplattformen, die Integration der von den Projektpartnern bereitgestellten Raney-Ni-Streckgitter-Elektroden sowie die Durchführung umfangreicher Betriebs- und Charakterisierungstests unter Bedingungen der alkalischen Wasserelektrolyse. Sämtliche Aufwendungen dienten der systemseitigen Bewertung der skalierbaren Elektroden und standen im direkten Zusammenhang mit den Kanadevia zugeordneten Projektzielen.

Die Mini-Stack-Elektroden (~100 cm²) wurden erfolgreich in den von Kanadevia Inova BioMethan entwickelten in den Mini-Stack integriert und über hundert Stunden betrieben. Die im Labor-Stack durchgeführten Versuche bildeten einen zentralen Schritt zwischen Laborcharakterisierung und Technikumsbetrieb der SkalPro-Elektroden. Unter den geforderten Bedingungen (30 % KOH, 10–14 bar, 70–80 °C) zeigte sich, dass die Elektroden grundsätzlich stabil betrieben werden konnten und Leistungswerte im Bereich des Stands der Technik erreichten. Während unterschiedliche Geometrievarianten der Streckgitter nur geringen Einfluss auf die Zellspannung hatten, erwiesen sich mechanische Faktoren wie Kontaktierung und Prozessbedingungen als wesentlich für die Performance.

Im Anschluss daran wurden auch des großformatigen Technikums-Elektroden (~8000 cm²) erfolgreich in den Kanadevia-Technikumselektrolyseur eingebaut und getestet. Der Betrieb verlief stabil und im erwarteten Leistungsbereich, womit die grundsätzliche Einsatzfähigkeit der skalierten Elektroden unter realen Stackbedingungen bestätigt wurde. Die wesentlichen Kanadevia Inova BioMethan zugewiesenen Ziele im Zusammenhang mit dem Short-Stack wurden erfüllt.

Die Versuche im industriellen Short-Stack stellten den ersten systemnahen Einsatz der SkalPro-Elektroden im Technikums-Massstab dar und zeigten deren Funktionsfähigkeit unter realen Betriebsbedingungen (≈ 14 bar, ca. 75 °C, 30 wt % KOH). Das erfolgreiche Upscaling stellt einen wichtigen Meilenstein dar und zeigt die prinzipielle Übertragbarkeit der Technologie auf größere Systeme. Dennoch besteht weiterhin Entwicklungsbedarf, insbesondere in den Bereichen Homogenisierung der Elektroden, sowie Qualitätssicherung in der Fertigung. Diese Aspekte sind entscheidend für eine industrielle Umsetzung.

Die im Projektverlauf gewonnenen Betriebsdaten, Beobachtungen zur Integration sowie Rückmeldungen zur Handhabung, Robustheit und zum Strömungs- und Gasverhalten der Elektroden wurden an die Entwicklungspartner weitergegeben und flossen direkt in die Bewertung und Optimierung des skalierbaren Herstellungsprozesses ein. Mit diesen Arbeiten erfüllte die Kanadevia Inova BioMethan GmbH die im SkalPro-Vorhaben vorgesehenen Arbeitspakete, und die erzielten Ergebnisse belegen die erfolgreiche systemseitige Validierung der entwickelten Raney-Ni-Streckgitterelektroden sowohl im Labor- als auch im Technikum-Maßstab. Die Ergebnisse verdeutlichen, dass die angepasste Kathode einen positiven Beitrag zur Performance von AEL-Systemen leisten kann, insbesondere auf technologischer Ebene. Ökonomisch sind die Effekte jedoch stark von der Degradation und den daraus resultierenden Wartungs- und Austauschzyklen abhängig.

2.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die Personalkosten bildeten eine zentrale Kostenposition im Teilvorhaben der Kanadevia Inova BioMethan GmbH und stehen im Einklang mit der vorgesehenen Planung. Weitere relevante Ausgaben entfielen auf Materialkosten für die Modifikation und den Betrieb der Laborversuchsanlage- und Technikumsanlage sowie auf F&E-Fremdleistungen, die zur Durchführung projektbezogener Aufgaben notwendig waren. Da die Zuwendung zu Projektbeginn der Hitachi Zosen Inova ETOGAS GmbH bewilligt wurde und die Arbeiten am Standort Zeven durchgeführt werden sollten, mussten konzerninterne Leistungsanteile über F&E-Fremdleistungen verrechnet werden. Hierdurch erklären sich die im Projekt hohen Aufwände in der Kostenposition FE-Fremdleistungen (0823). Im Laufe des Projektes wechselte dann aufgrund von personellen Zwängen der Zuwendungsempfänger Hitachi Zosen Inova ETOGAS zu Hitachi Zosen Inova BioMethan (später Kanadevia Inova BioMethan). Auch hier erfolgte noch eine punktuelle Unterstützung der Kanadevia Inova Biomethan mit personellen Ressourcen, um die Zeitplanung einzuhalten und im Konzern vorhandene Kompetenzen ideal einzusetzen. Die abgerechneten Kosten bis einschließlich 2025 ergeben sich aus der folgenden Tabelle.

Tabelle 5 Auszug aus dem zahlenmäßigen Nachweis

Position	Angefallene Kosten im Projekt
0813 Material	95.239,83 €
0823 FE-Fremdleistung	118.221,70 €
0837 Personalkosten	96.722,25 €
0838 Reisekosten	0,00 €
0847 vorhabensspezifische Abschreibungen	0,00 €
0848 AfA sonstige	0,00 €
0850 sonstige unmittelbare Vorhabenskosten	358,76 €
0856 Kosten innerbetrieblicher Kosten	0,00 €
0860 Verwaltungskosten	0,00 €
Summe	310.542,54 €

2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten

Die Entwicklung und Untersuchung großformatiger Elektroden für die alkalische Wasserelektrolyse ist ein zentraler Bestandteil des technologischen Fortschritts in der Wasserstofferzeugung. Da leistungsfähige und skalierbare Elektroden bislang nur begrenzt verfügbar sind, stellen Systemtests unter realistischen Betriebsbedingungen einen wesentlichen Baustein dar, um die Einsatzfähigkeit neuer Elektrodenkonzepte zu bewerten. Die im Rahmen des Teilvorhabens durchgeführten Arbeiten, insbesondere die Entwicklung der Zero-Gap-Zellarchitektur, der Aufbau des Mini- und Short Stack, die Technikumsversuche sowie die Validierung der SkalPro-Elektroden unter Druck- und Temperaturbedingungen, waren notwendig, um die Übertragbarkeit der Laborergebnisse im technischen Maßstab zu gewährleisten.

Die Arbeiten erwiesen sich als angemessen, da sie die systemtechnische Perspektive des Verbunds ergänzten und damit eine realitätsnahe Bewertung der Leistungsfähigkeit und Belastbarkeit der SkalPro-Elektroden ermöglichten. Durch die Untersuchungen im Mini- und Short-Stack konnten zentrale Erkenntnisse zu Kontaktierung, Temperatur- und Druckstabilität und Zellspannungsverhalten gewonnen werden, die für die weitere Technologieentwicklung erforderlich sind. Damit leistete das Teilvorhaben einen wichtigen Beitrag zur Gesamtzielstellung des Verbunds, die Skalierbarkeit und Praxistauglichkeit der SkalPro-

Elektrodenfertigungsprozesskette abzusichern. Aufgrund dieser Erfolge sind aus Sicht der Kanadevia Inova BioMethan GmbH die geleisteten Arbeiten erforderlich und verhältnismäßig gewesen.

2.4 Voraussichtlicher Nutzen

Die Ergebnisse des SkalPro-Projekts bieten der Kanadevia Inova BioMethan GmbH bedeutende technische und wirtschaftliche Vorteile. Mit der erfolgreichen Integration und dem Betrieb von Raney-Ni-Streckgitterelektroden im Mini-Stack und im industriellen Short-Stack konnten wichtige Erkenntnisse zur Leistungsfähigkeit, Stabilität und Skalierbarkeit dieser neuen Elektroden unter praxisnahen Bedingungen gesammelt werden. Die Versuche ermöglichten eine gezielte Bewertung des elektrochemischen Verhaltens großflächiger Kathoden, ihrer thermischen und hydraulischen Stabilität sowie der mechanischen Integrität bei Dauerbetrieb. Diese Ergebnisse schaffen eine solide Grundlage für künftige Systementwicklungen und erlauben eine realistische Einschätzung des Potenzials der Elektroden in Bezug auf Effizienz, Robustheit und Lebensdauer.

Zusätzlich unterstützen die erhobenen Betriebsdaten die Beurteilung der Wirtschaftlichkeit von Elektroden und liefern wertvolle Impulse für die nächsten Schritte der Industrialisierung, insbesondere hinsichtlich Prozessstabilisierung, Qualitätssicherung und der Auslegung von Druckelektrolyse-Stacks.

Neben der Entwicklung der SkalPro-Elektroden konnte das Unternehmen weitere wichtige Erkenntnisse zur prozesstechnischen Auslegung, möglichen Fehlerquellen und zum Betrieb von Druck-Elektrolyseanlagen – besonders im Zero-Gap-Setup – gewinnen.

Diese Resultate fließen direkt in die Weiterentwicklung zukünftiger Stack-Generationen und in das Engineering des «Balance of Plants» ein und eröffnen Möglichkeiten, neue Elektrodenmaterialien in bestehende und kommende Zellkonzepte zu integrieren.

Insgesamt stärken die gewonnenen Erkenntnisse die technologische Basis für den industriellen Einsatz von Zero-Gap-Druckelektrolyseuren und fördern ein verbessertes Prozessdesign, das die Kompetenzen am Standort Zeven sowie die wirtschaftliche Wettbewerbsfähigkeit nachhaltig verbessert.

2.5 Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Während der Laufzeit des SkalPro-Vorhabens wurden von Kanadevia Inova BioMethan verschiedene externe Entwicklungen im Bereich der alkalischen Wasserelektrolyse beobachtet. Dazu zählten insbesondere der fortschreitende Ausbau großtechnischer AEL-Kapazitäten sowie kontinuierliche Aktivitäten in industrie- und forschungsgetriebenen Programmen zur Weiterentwicklung von Elektrodenmaterialien und Herstellungsverfahren. Parallel dazu erschienen mehrere wissenschaftliche Arbeiten, die sich mit der Optimierung von Elektrodenstrukturen, dem Gasblasenverhalten und der Betriebsstabilität von AEL-Systemen befassten.

Diese Entwicklungen bestätigten die Relevanz einer skalierbaren und robusten Elektrodenfertigungsprozesskette und unterstrichen die Bedeutung praxisnaher Systemtests. Sie hatten jedoch keinen unmittelbaren Einfluss auf die Durchführung des eigenen Teilvorhabens, das weiterhin auf die systemtechnische Validierung der im Verbund entwickelten SkalPro-Elektroden ausgerichtet blieb.

2.6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses nach Nr. 5 der NKBF

Die Ergebnisse des Teilvorhabens wurden projektintern sowie im Rahmen der Verbundtreffen vorgestellt und diskutiert. Eine externe wissenschaftliche Veröffentlichung durch die Kanadevia Inova BioMethan GmbH erfolgte nicht, da die im Teilvorhaben durchgeführten Arbeiten überwiegend systemtechnische Validierungen betrafen und keine materialwissenschaftlichen Forschungsergebnisse lieferten.

Die übergeordneten Inhalte des Verbundprojekts wurden von dem Forschungspartner Fraunhofer IFAM auf verschiedenen Fachveranstaltungen und themenspezifischen Workshops präsentiert, wie im Abschlussbericht des IFAM dokumentiert ist. Eine mögliche Einbindung der systemseitigen Ergebnisse in zukünftige Verbund- oder Partnerpublikationen wird geprüft.

3 Anlagen zum Schlussbericht

Quellenangaben:

- [1] Reissner, R., et al. (2020): *Qualifying tests of electrolyzers for grid services – Finalized testing protocol*. Zenodo.
- [2] Tsoitridis, G. & Pilenga, A. (2021): EU harmonised protocols for testing of low temperature water electrolyzers, EUR 30752 EN. Publications Office of the European Union, Luxembourg. ISBN 978-92-76-39266-8, doi:10.2760/58880, JRC122565.
- [3] FfE (2025): *Von der Theorie zur Praxis: Warum grüner Wasserstoff teurer ist als gedacht*.
https://www.ffe.de/wp-content/uploads/2025/07/Discussion_Paper-Investitionskosten_Elektrolyse-2.pdf,
abgerufen am 26.03.2026.
- [4] Holst, P., et al. (2021): Cost Forecast for Low Temperature Electrolysis – Technology Driven Bottom-Up Prognosis for PEM and Alkaline Water Electrolysis Systems. Fraunhofer Institut für Solare EnergieForschung, abgerufen von
https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/images/allgemein/2021_CATF_Report_Electrolysis_final.pdf am 20.03.2026.

Testplanung der Laborversuche mit dem Mini-Stack

Zieltemperatur:	80°C
Zieldruck:	14 bar
KOH-Konzentration:	30 wt %
Elektrodengröße:	~100 cm ²
Zellspannungsmessung:	Zelle 1-13

Tabelle 6: Versuchsplan zur strukturierten Abarbeitung der Versuche auf der Laboranlage

1. Testserie	Schritt	Stromdichte (Acm ⁻²)	Dauer (h)
1.1	KOH Probennahme		
1.2	Konditionierung	0.3	2
1.3	UI Kurve	0-0.3 / 0.3-0	0.5
1.4	Galvanostatisch	0.3	24
1.6	UI Kurve	0-0.3 / 0.3-0	0.5
1.7	UI Kurve	0-0.5 / 0.5-0	0.5
1.8	Galvanostatisch	0.5	24
1.9	UI Kurve	0-0.5 / 0.5-0	0.5
1.10	KOH Probennahme		
1.11	UI Kurve	0-1.0 / 1.0-0	0.5
1.12	Galvanostatisch	0.5	24
1.13	UI Kurve	0-1.0 / 1.0-0	0.5
1.14	KOH Probennahme		

Testplanung der Technikumsversuche mit dem industriellen Short-Stack

Zieltemperatur:	75°C
Zieldruck:	14 bar
KOH-Konzentration:	30 wt %
Elektrodengröße:	~8000 cm ²
Zellspannungsmessung:	Zelle 1-4
Volumenstrom:	330 l/h

Tabelle 7: Versuchsplan zur strukturierten Abarbeitung der Versuche auf der Technikumsanlage.

	Testsequenz	Schritt	Stromdichte (Acm ⁻²)	Dauer (h)
Leistungsaufnahme der Elektroden	1.1	KOH Probennahme		
	1.2	Anfahren der Versuche	0.3	24
	1.3	UI Kurve	0-0.3 / 0.3-0	0.5
Galvanostatik	2.1	Galvanostatisch	0.3	24
	2.2	KOH Probennahme		
	2.3	UI Kurve	0-0.3 / 0.3-0	0.5
	2.4	Galvanostatisch	0.3	48
	2.5	KOH Probennahme		
	2.6	UI Kurve	0-0.42 / 0.42-0	0.5
	2.7	Galvanostatisch	0.3	48
	2.8	KOH Probennahme		
	2.9	UI Kurve	0-0.42 / 0.42-0	0.5
	2.10	Galvanostatisch	0.3	72
	2.11	KOH Probennahme		
	2.12	UI Kurve	0-0.42 / 0.42-0	0.5
	2.13	Galvanostatisch	0.3	72
	2.14	KOH Probennahme		
	2.15	UI Kurve	0-0.42 / 0.42-0	0.5
	2.16	Galvanostatisch	0.3	72
	2.17	KOH Probennahme		
	2.18	UI Kurve	0-0.5 / 0.5-0	0.5
	2.19	Galvanostatisch	0.3	72
	2.20	KOH Probennahme		
	2.21	UI Kurve	0-0.5 / 0.5-0	0.5
	2.22	Galvanostatisch	0.3	96
	2.23	KOH Probennahme		
2.24	UI Kurve	0-0.5 / 0.5-0	0.5	
2.25	Galvanostatisch	0.3	96	
2.26	KOH Probennahme			
2.27	UI Kurve	0-0.5 / 0.5-0	0.5	
2.28	Galvanostatisch	0.3	96	
2.29	KOH Probennahme			
2.30	UI Kurve	0-0.5 / 0.5-0	0.5	
2.31	Galvanostatisch	0.3	96	
2.32	KOH Probennahme			
2.33	UI Kurve	0-0.6 / 0.6-0	0.5	
Dynamische Last Degradation	3.1	Accelerated Ageing	0,1-0,5	160
	3.2	KOH Probennahme		
	3.3	UI Kurve	0-0.5 / 0.5-0	0.5