

Rostock 30.09.2025

**Verbundvorhaben: H2Giga\_TP\_SEGIWA**  
**Serienproduktion von Elektrolyseuren im Gigawattbereich**  
**Teilvorhaben: Iridium-arme Anodenmaterialien für die**  
**Serienfertigung**

---

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

---

Laufzeit:	01.05.2021-31.03.2025
Förderkennzeichen:	03HY121E
Vorhabenbezeichnung:	Verbundvorhaben H2Giga_TP_SEGIWA, Teilvorhaben: Serienproduktion von Elektrolyseuren im Gigawattbereich, Teilvorhaben: Iridium-arme Anodenmaterialien für die Serienfertigung
Zuwendungsempfänger:	Leibniz-Institut für Katalyse e.V. (LIKAT)
Autor:	Dr. Annette-E. Surkus
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

Für das Verbundvorhaben SEGIWA wurden bei Antragsstellung Materialentscheidungen getroffen, die dem damaligen Stand der Technik entsprachen. Während der Projektlaufzeit sollten aber in dem Arbeitspaket 5 (AP 5: Alternative Komponenten für die Serienfertigung) geprüft werden, ob der Einsatz von alternativen Materialien möglich ist, damit die dadurch verbundene Kostenersparnis zu einem langfristigen Einsatz bzw. einer höheren Akzeptanz der Technologie führen können. In dem Teilvorhaben des LIKAT sollten daher in engem Informationsaustausch mit dem Innovationspool (IREKA, QT1.3) Iridium-arme Anodenkatalysatoren in der Synthese in Richtung industrielles Niveau hochskaliert werden, für einen Einbau in die MEA zur Verfügung gestellt werden sowie im Industriekontext validiert werden.

Das Teilvorhaben „Iridium-arme Anodenmaterialien für die Serienfertigung“ war in drei Arbeitspakete gegliedert. Inhalte des Arbeitspaketes AP 5.2.1 waren Vorversuche zur Hochskalierung der Synthese. Das Arbeitspaket 5.2.2 enthielt Arbeiten zum Benchmarking der alternativen Materialien in Form der MEA. Im Arbeitspaket AP5.2.3 wurden dann die alternativen Materialien im industriellen Anwendungstest bei Siemens energy (SE) getestet. In der Projektlaufzeit sollten zwei Meilensteine erfüllt werden, zum einen nach 24 Monaten Laufzeit der Meilenstein MS 5.2.1 „Alternativmaterial identifiziert“: Es wird mindestens ein Iridium-armer Elektrokatalysator identifiziert, der vom 1-g-Maßstab auf den 10-g-Maßstab in der Synthese hochskaliert wird und nach 44 Monaten Laufzeit der Meilenstein MS 5.2.2 „Alternativmaterial für den MEA-Aufbau“: 10 g eines Iridium-armen Anodenkatalysators stehen für die Zusammenführung in der MEA zur Verfügung.

#### 1.1. AP 5.2.1: Vorversuche zur Hochskalierung der Synthese

Im AP 5.2.1 erfolgten erste Vorversuche zur Hochskalierung der Synthese. Wie geplant wurde zunächst die Peripherie aufgebaut, um einen vergrößerten Syntheseansatz durchführen zu können. Dazu gehörte auch der Kauf und die Installation eines entsprechenden Klapprohrofens mit integrierten Gasflussmessern (Abbildung 1) Aufgrund der hohen Iridium-Kosten wurde die Entwicklungsarbeit im Projekt QT1.3 - IREKA lediglich im 200-mg-Maßstab durchgeführt; diese Menge ist aber nur ausreichend für eine Erfassung der elektrochemischen Parameter sowie der notwendigen analytischen Charakterisierung.

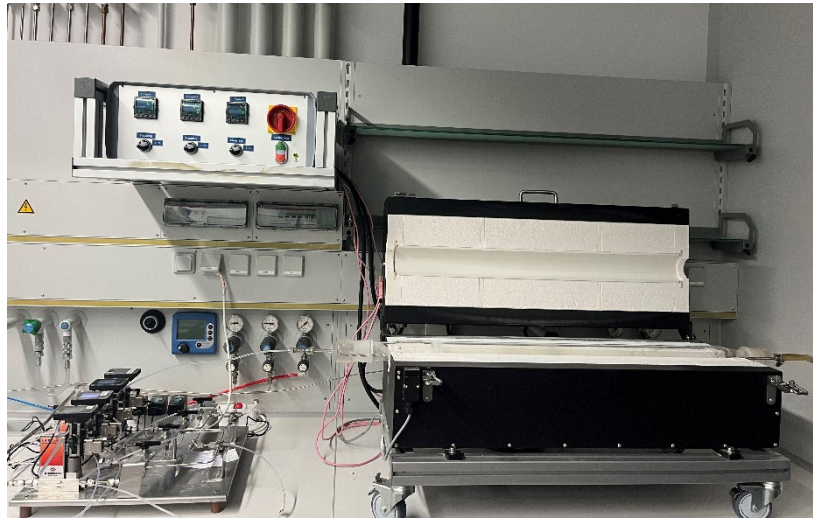


Abb. 1: Synthesepplatz und Klapprohfen für die thermische Behandlung.

Weiterhin erfolgte im Austausch mit den anderen SEGIWA-Partnern, die am AP 5 beteiligt waren, eine Festlegung des Benchmark-Materials. Dabei handelt es sich um einen ungeträgerten IrO<sub>2</sub>-Katalysator von Heraeus (H2EL-IrO; 83 Masse% Ir). Durch den Austausch mit dem IREKA-Projekt (QT1.3) aus dem Innovationspool wurde die Erarbeitung eines elektrochemischen Testprotokolls ermöglicht, mit dem die Ergebnisse der Hochskalierungs-Arbeiten miteinander und bezogen auf den Benchmark hinsichtlich Aktivität und Stabilität verglichen werden konnten. Diese elektrochemischen Ergebnisse (Abbildungen 2 und 3) wurden auf den SEGIWA-Projekttreffen sowie den monatlichen AP 5-Meetings den Verbundpartnern präsentiert.

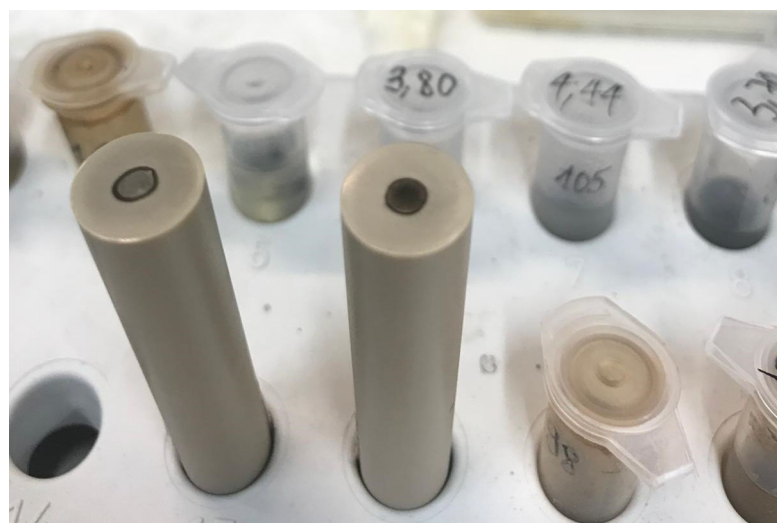


Abb. 2: Elektrochemische Messzelle und vorbereitete Elektroden (RDE) für die Wasseroxidation.

Für die anstehenden Vorversuche wurde zunächst ein auf TiO<sub>2</sub> geträgerter IrO<sub>2</sub>-Katalysator gewählt, um den vergrößerten Aufbau zu testen. Basierend auf den Entwicklungsarbeiten im

Querschnittsthema QT 1.3 (IREKA) und dem Austausch zum Meilenstein MS 5.2.1 („Alternativmaterial identifiziert“: Es wird mindestens ein Iridium-armer Elektrokatalysator identifiziert, der vom 1-g-Maßstab auf den 10-g-Maßstab in der Synthese hochskaliert wird) wurde ein Alternativmaterial identifiziert. Dabei handelt es sich um ein Iridium-Zinn-Komposit geträgert auf TiN. Mit dieser Festlegung wurde der Meilenstein inhaltlich und termingerecht zum Projektmonat 24 erfüllt. Durch den Vergleich der elektrochemischen Aktivitäten sowie der analytischen Ergebnisse der Strukturaufklärung sollte daraufhin ermittelt werden, inwieweit das Hochskalieren erfolgreich war und wie das Verfahren noch weiter optimiert werden kann. Abbildung 3 zeigt die so erhaltenen Ergebnisse für den gewählten Benchmark sowie für das erste synthetisierte, Iridium-arme Anodenmaterial.

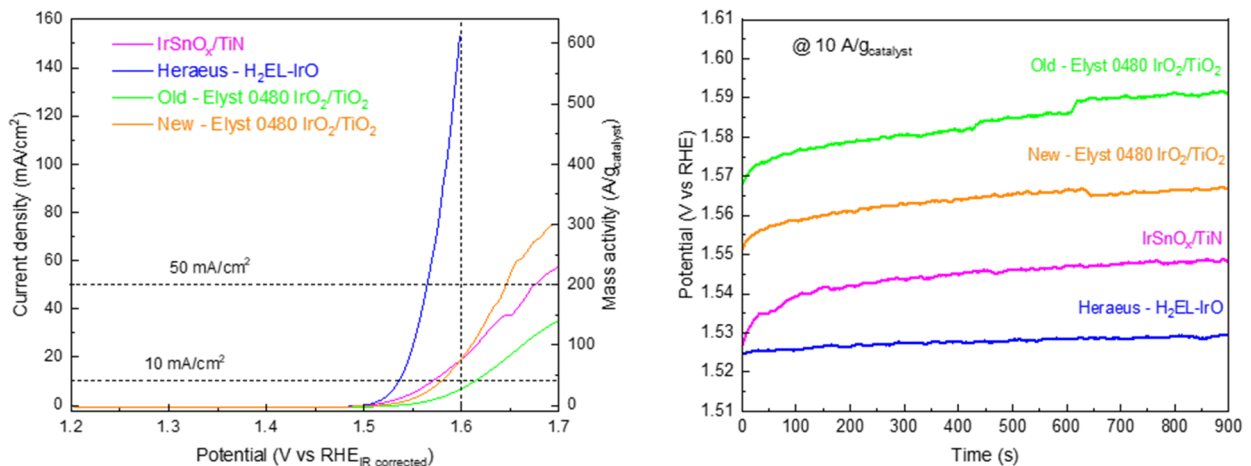


Abb. 3: Elektrochemische Testmethoden zum Vergleich der Aktivität (links: LSV in 0,5 M H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>; WE: Pt, CE: Pt, RE: Ag/AgCl/3M KCl;  $\omega=400$  rpm) und Stabilität (rechts: Galvanostatischer Scan bei konstanter Stromdichte von 10 A/g<sub>Katalysator</sub>).

Die Ziele des AP 5.2.1 sowie der Meilenstein MS 5.2.1 wurden erreicht.

## 1.2. AP 5.2.2: Benchmarking der alternativen Materialien in Form der MEA

Im AP 5.2.2 sollten die Syntheseparameter für die Hochskalierung festgelegt werden und für mindestens ein Iridium-armes Anodenmaterial angewendet werden. Bei der Auswahl des Materials wurden auch Informationen aus dem Querschnittsthema QT 1.3 im Innovationspool verarbeitet. Für die Aufbringung auf die PEM-Folie musste eine Tinte formuliert werden; in diesem Arbeitspaket sollte die Tintenzusammensetzung optimiert werden. Es erfolgten neben der Erfassung der elektrochemischen Aktivität erste Stabilitätsuntersuchungen, vor allem unter Langzeitbedingungen und / oder industrierelevanten Stromdichten.

Die Wiederholung der Synthese aus dem QT 1.3 führte zu einem Material mit vergleichbar guten Ergebnissen. Die Hochskalierung bis zu 500-mg-Ansätzen führte nur zu geringen Leistungsverlusten; doch eine Hochskalierung auf den 1-g-Maßstab konnte nicht mehr das gleiche hochaktive Material erzeugen. Die elektrochemische Leistung und die Stabilität wurden durch den vergrößerten Ansatz schlechter (Abbildung 4). Der Grund dafür liegt vor allem in der anaeroben Versuchsführung. Im elektrochemischen Test fielen auch Probleme bei der Reproduzierbarkeit auf. Hier mussten noch weitere Arbeiten erfolgen, die die Kristallitgröße reduzierten und die Oberflächeneigenschaften veränderten, damit die Tintendispersion länger haltbar ist und sich das Komposit nicht zu schnell wieder absetzt. Diese Tinte muss auch einen abdeckenden, homogenen Elektrodenfilm auf der Elektrode bzw. MEA ermöglichen. Ein Ansatzpunkt dazu war, den kristallinen Charakter des Trägers TiN in ein möglichst amorphes Erscheinungsbild zu ändern. Dazu wurde der Träger mit verschiedenen Säuren vorbehandelt und die Auswirkungen auf die Kristallite mittels XRD verfolgt. Darüber hinaus wurde auch versucht, den Träger TiN in amorpher Form selbst herzustellen bzw. die Metalle Iridium und Zinn gemeinsam mit den TiN-Präkursoren in einem Syntheseschritt zusammenzubringen.

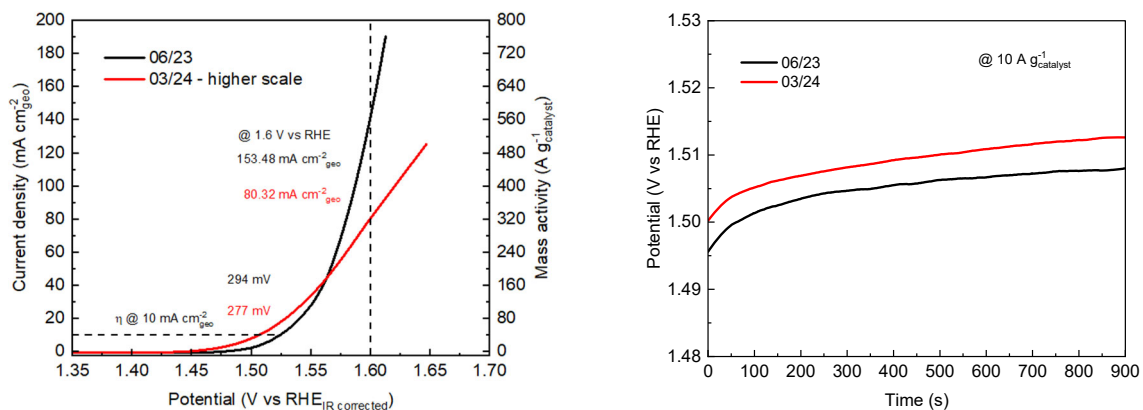


Abb. 4: Vergleich von Chargen nach Hochskalierung (links: LSV in 0,5 M H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>; WE: Pt, CE: Pt, RE: Ag/AgCl/3M KCl;  $\omega$ =1800 rpm) und erste Langzeitversuche (rechts: Galvanostatischer Scan bei konstanter Stromdichte von 10 mA/cm<sup>2</sup> für 2 Stunden).

Weitere Versuche zur Optimierung der Synthese führten zu einer Optimierung des Stoffmengenverhältnisses zwischen Iridium und Zinn sowie zu einer erhöhten Beladung des TiN-Supports mit Iridium (von vorher 20 Masse% auf nun 50 Masse%). Mit diesen neuen Parametern gelang die Synthese bis zum 5-g-Maßstab. In Rücksprache mit den Verbundpartnern, vor allem der im AP 5 beteiligten Partner, wurde die weitere Hochskalierung ausgesetzt. Gründe waren zum einen die bereits erkannten Probleme in der Synthese im 1- und 5-g-Maßstab, neu

entwickelte und leistungsstarke Materialien im QT 1.3, die nicht auf dieser anaeroben Synthese beruhten sowie die sehr hohen Iridium-Kosten, die anfallen würden, wenn die 10-g-Synthese weiter optimiert werden soll. Damit sind zur Synthese von 10 g Iridium-reduziertes Material zwei Synthese-Batches notwendig. Der im hochskalierten Maßstab synthetisierte Katalysator wurde analytisch charakterisiert (Abbildung 5) und für die Arbeiten in den weiteren APs den Verbundpartnern zur Verfügung gestellt.

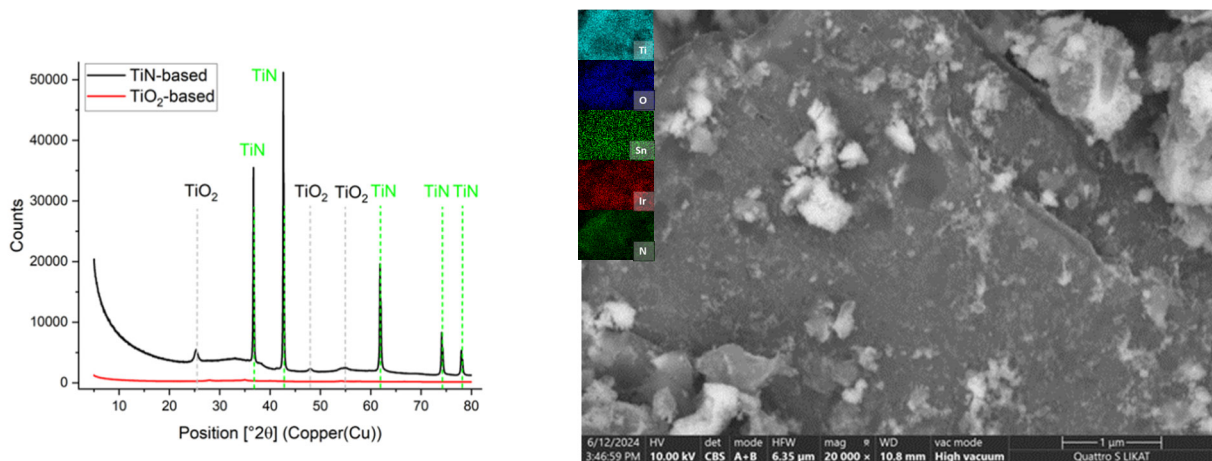


Abb. 5: Analytische Charakterisierung des getragenen IrSnO<sub>x</sub> auf TiN (links: XRD, rechts: REM mit EDX).

Basierend auf einem zweiten evaluierten Material, einem Ruthenium-Iridium-Komposit (ungeträgert) wurden ebenfalls Hochskalierungen durchgeführt. Der dabei bestimmende Schritt ist eine vorgeschaltete Gefriertrocknung, bei dem auch Anteile der Präkursoren durch Sublimation verloren gingen und damit die Ausbeute reduzierten. Mit diesem Material gelang ebenfalls die 5-g-Maßstab-Synthese und das mittels elektrochemischen Protokolls und Strukturanalytik untersuchte Material konnte den Verbundpartnern im Rahmen der folgenden Arbeitspakete zur Verfügung gestellt werden.

Parallel zur Tintenoptimierung in diesem Teilvorhaben hatten sich auch die weiteren Partner im AP 5 mit diesem Aspekt beschäftigt. Da bei diesen Verbundpartnern (SE, HS, RWTH) auch die entsprechenden Beschichtungstechnologien (Rakeln, Sprühen, Drucken, Sputtern) etabliert sind und für die Zusammenführung in der MEA eingesetzt werden sollen, wurden letztendlich die dort entwickelten Rezepturen genutzt.

In diesem AP 5.2.2 wurden zwei Materialien erfolgreich hochskaliert, um sie den Verbundpartnern für den industriellen Anwendungstest zur Verfügung zu stellen. Beide Materialien wurden elektrochemisch untersucht, analytisch charakterisiert und hinsichtlich der Stabilität im stark

korrosiven Medium zu untersuchen. Abbildung 6 zeigt die elektrochemische Leistung dieser beiden Materialien, die nun nur noch 50 Masse% Iridium enthalten anstelle der sonst üblichen 80-90 Masse%.

Die Ziele des AP 5.2.2 wurden erreicht, die Syntheseparameter wurden für die Hochskalierung festgelegt. Zusätzlich zu den geplanten Zielen konnte aber auch noch ein zweiter Kandidat für den möglichen Einsatz im Elektrolyseur vorgeschlagen werden. Beide Kandidaten erlauben nun eine Reduzierung des Iridium-Gehaltes um ca. 40% auf Werte um 50 Masse% Iridium.

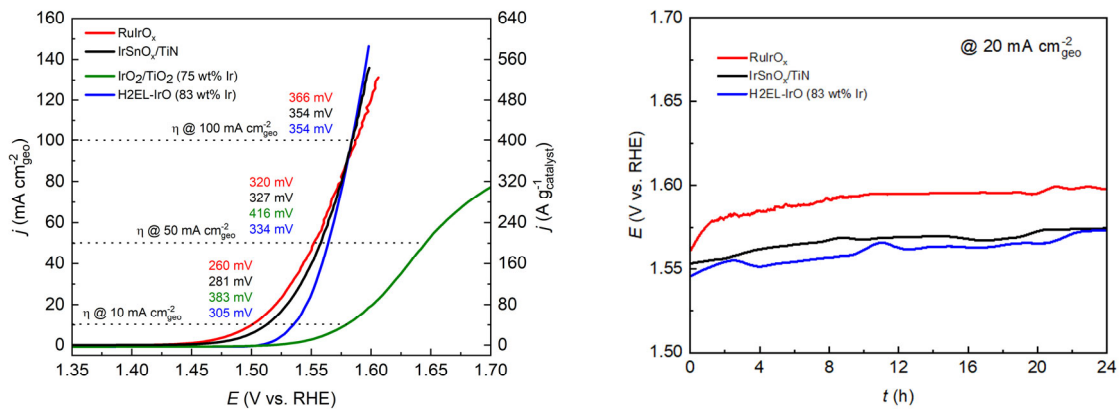


Abb. 6: Vergleich der Aktivitäten (links: LSV in 0,5 M H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>; WE: Pt, CE: Pt, RE: Ag/AgCl/3M KCl;  $\omega$ =18000 rpm) und Stabilitäten (rechts: Galvanostatischer Scan bei konstanter Stromdichte von 20 mA/cm<sup>2</sup> über 24 Stunden) für die beiden evaluierten Iridium-Anodenkatalysatoren, synthetisiert im 5-g-Maßstab.

### 1.3. AP 5.2.3: Industrieller Anwendungstest

Im AP 5.2.3 sollte mit dem favorisierten Iridium-armen Anodenmaterial die hochskalierte Synthese durchgeführt werden. Dieses Material sollte zum Einbau in die MEA zur Verfügung gestellt werden. Anschließend sollte mit der MEA aus den alternativen Materialien des AP 5 der industrielle Anwendungstest durchgeführt werden. In dieses Arbeitspaket fiel der Meilenstein MS 5.2.2 Alternativmaterial für den MEA-Aufbau (nach 44 Monaten): 10 g eines Iridium-armen Anodenkatalysators stehen für die Zusammenführung in der MEA zur Verfügung.

Mittels der optimierten Synthesebedingungen erfolgte die Synthese von zwei aussichtsreichen Kandidaten im hochskalierten Maßstab. Dabei wurde aber nicht bis zum 10-g-Maßstab gearbeitet, da es weiterhin Optimierungsbedarf hinsichtlich der Reproduzierbarkeit der

Leistungswerte und der Stabilität gab und die Hochskalierung an diesem Punkt aufgrund des hohen Iridium-Preises zu teuer wäre.

So war es in der Projektlaufzeit möglich, den auf TiN geträgerten Iridium-Zinn-Katalysator zum einen Hahn-Schickard (HS) für einen PEMWE-Einzelzell-Test als auch der RWTH Aachen zum Aufbau einer MEA zur Verfügung zu stellen. Am HS wurden mittels einem Barcoater eine Katalysatorschicht auf einer Nafion-Membran erzeugt, die 50 µm dick war und 0,5 mg<sub>Ir</sub>/cm<sup>2</sup> enthielt. Als Gegenelektrode diente Toray-Paper mit einer Platin-Beladung von 0,5 mg/cm<sup>2</sup>. Zu Vergleichszwecken wurde eine Membran auch mit dem Benchmark (H2EL-IrO, Heraeus) beschichtet. Das Testprotokoll war angelehnt an eine Arbeit von Maximilian Möckl (J. Electrochem. Soc. 2022, 169, 064505). Die Ergebnisse sind in Abbildung 7 dargestellt.

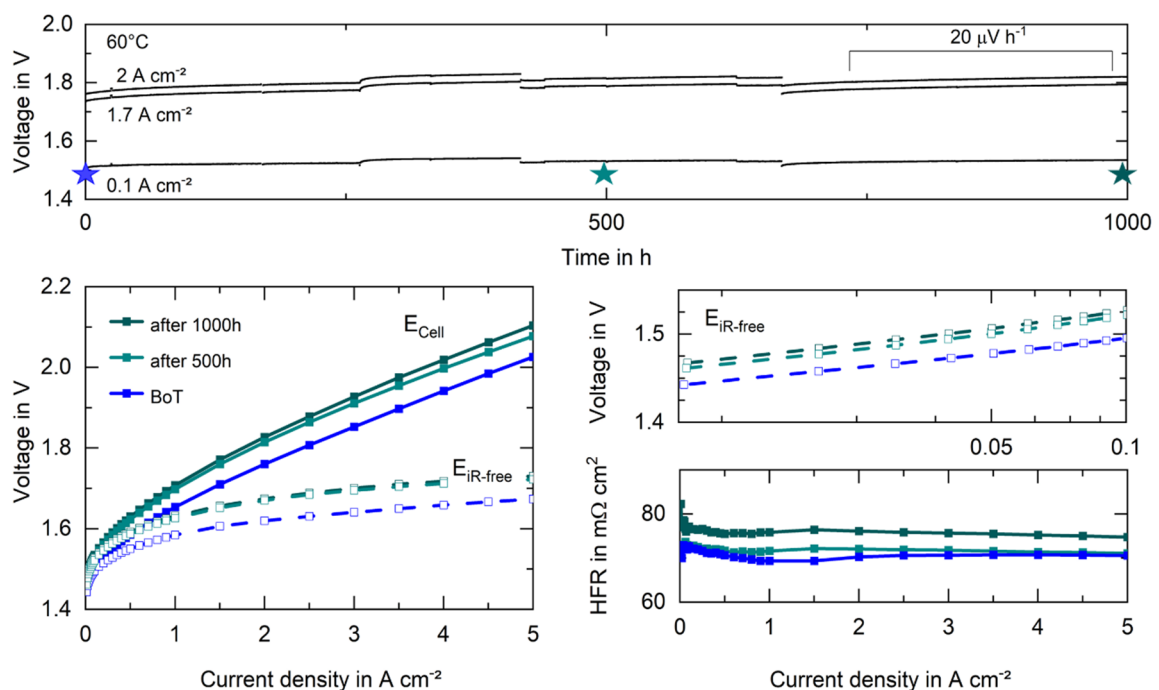


Abb 7: Eignungstest über 1000 Stunden bei unterschiedlichen Zyklen von Stromdichten (0,1; 1,75; 2 A/cm<sup>2</sup> jeweils 10 min); T=60°C (oben), Polarisationskurven zum Beginn der Testung (BoT), nach 500 Stunden und nach 1000 Stunden (unten links) sowie Vergleiche in Spannung und HFR zum Beginn der Testung (BoT) und nach 500 bzw. 1000 Stunden (unten rechts).

Die Ergebnisse dieses Tests zeigten eine hervorragende Eignung des Materials; so erreichte das Material 1,85 V Spannung und 70 mΩ cm<sup>2</sup> HRF bei 3 A/cm<sup>2</sup> Stromdichte zu Beginn des Langzeittestes, wobei in den letzten 250 Stunden ein Spannungsverlust von nur 20 µV/h auftrat und ein Verlust in HRF von 2 mΩ cm<sup>2</sup>. Damit verhält sich das Material ähnlich wie der Benchmark.

Nach diesen 1000 Stunden Belastungstest traten auch keine sichtbaren Änderungen an der Membran auf sowie kein Transfer des Materials in die PTL. Die Ergebnisse dieser Zusammenarbeit wurden auch durch HS in ihrem Abschlussbericht dokumentiert und werden demnächst publiziert. An der RWTH wurde nun das gleiche Material auf eine fluorfreie Membran aufgebracht; die Ergebnisse dieser Zusammenarbeit sind dann im Abschlussbericht der RWTH zu finden.

Der zweite Iridium-arme Kandidat, ein Ruthenium-Iridium-Komposit ohne Träger, wurde Siemens energy (SE) zur Verfügung gestellt. Erste Leaching-Versuche in Säure und Wasserstoffperoxid zeigten keine Auflösung bzw. Korrosion des Materials. Auch dort wurde ein 1000-Stunden-Stress-Test durchgeführt; die Ergebnisse werden durch SE im Projektabschlussbericht mitgeteilt.

In die Bearbeitungszeit dieses Arbeitspaketes war der zweite Meilenstein anvisiert: MS 5.2.2 (44 Monate) „Alternativmaterial für den MEA-Aufbau: 10 g eines Iridium-armen Anodenkatalysators stehen für die Zusammenführung in der MEA zur Verfügung“. Aufgrund der damals noch laufenden Arbeiten mit beiden Iridium-reduzierten Materialien in der MEA am Hahn-Schickard sowie bei Siemens energy wurde der Meilenstein geringfügig verschoben auf 02/25 (47 Monate). Zu dem Zeitpunkt stand dann die erforderliche Menge des Iridium-armen Anodenkatalysators für die Zusammenführung in der MEA der RWTH zu Verfügung. Damit wurden die Ziele dieses Arbeitspaketes erreicht.

## 1.4. Zusammenfassung

Die vom LIKAT durchgeführten Arbeiten im Teilvorhaben „Iridium-arme Anodenmaterialien für die Serienfertigung“ im Rahmen des Verbundprojektes SEGIWA „Serienproduktion von Elektrolyseuren im Gigawatt-Bereich“ erfolgten entsprechend dem geplanten Arbeits- und Kostenplan. Die drei Arbeitspakete wurden abgeschlossen, die zwei gesetzten Meilensteine erreicht. Es gab keine Probleme oder fehlende Finanzierungen, die den erfolgreichen Abschluss behindert hätten. Im Ergebnis der Projektarbeiten konnten zwei Iridium-arme Anodenmaterialien in der Synthese hochkaliert und für eine Testung in Richtung industrieller Kontext den Projektpartnern zur Verfügung gestellt werden. Die ersten Ergebnisse aus diesen Tests weisen auf eine gute Eignung als Anodenkatalysators für die PEM-Elektrolyse hin, wobei diese mit dem Benchmark vergleichbare Leistung mit einem um 40 Masse% Iridium geringeren Material erreicht werden konnte.

## 2. Darstellung der wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Folgende Ausgaben fielen während der Projektlaufzeit an:

812, Personal:	154.569,01 €
843, Sonst. Allg. Verw.-Ausgaben:	60.543,26 €
846, Dienstreisen:	5.165,19 €
850, Gegenstände über 410 €	15.272,94 €
<b>Ausgaben, gesamt:</b>	<b>235.550,40 €</b>

Mit den Mitteln 812, Personal wurden die Wissenschaftler Dr. Annette-E. Surkus, Dr. Shital Kale und die Doktorandin Trang Minh Pham bezahlt, die die Bearbeitung des Projektes übernahmen. Die gekauften Sachmittel (843) waren im Wesentlichen Iridium-Präkursoren (Sigma-Aldrich: 522 €, 1803 €, 1922 €, 776 €, 921 €, 802 €, 889 €, 5.717 €; ABCR: 968 €; STREM: 357 €, 713 €; =**15.390 €**), Iridium-Benchmark-Materialien (Umicore, 2.637 €), weitere Metallsalze (Fisher Sci.: 281 €, Sigma-Aldrich: 835 €, 612 €, 306 €; =2.034 €) und Ethylenglycol (Sigma-Aldrich: 586 €, 124 €, 371 €, 248 €, 601 €, 585 €; =2.515 €) für die Synthese, Elektrolytlösungen für die elektrochemischen Messungen (Geyer: 507 €, 288 €, 669 €, 1045 €; =2.509 €), Zubehör für die Installation der Ofen- und Gasperipherie (Swagelok: 71 €, 641 €, 338 €), Elektroden (Metrohm: 453 €, 1.629 €, 1.770 €, 1.258 €, 1.752 €, 1.173 €; Xylem: 789 €; =**8.824 €**), Messbecher für die elektrochemischen Untersuchungen (Metrohm: 1.049 €), Komponenten für den Aufbau der Syntheseapparatur unter anaeroben Bedingungen (FengTecEx: 474 €), allgemeines Laborzubehör (Fisher Sci: 418 €, 618 €, 281 €; Roth: 692 €, 707 €, 351 €, 208 €, 233 €, 721 €, 910 €, Deutero: 304 €; =**5.443 €**) sowie ein Presswerkzeug zur Herstellung von Pellets zur Leitfähigkeitsmessung (Maassen: 654 €). In den Mitteln 843 sind auch die Overheadpauschalen (10 % auf PK) der angestellten Projektmitarbeiter (**15.457 €**) enthalten. Den höchsten Anteil hatten neben den Overheadpauschalen vor allem die Iridium-Präkursoren, die elektrochemische Ausstattung mit Elektroden und das allgemeine Laborzubehör zur Realisierung der Synthese im vergrößerten Maßstab.

In der Position 846, Dienstreisen sind vor allem Fahrten zu SEGIWA-Projekttreffen (Nr. 4, 5, 6, 7, 10), zur H2Giga-Statuskonferenz (Nr. 1, 3), zu Konferenzen in Deutschland mit Poster- oder Vortragsbeitrag (Nr. 8, 9, 11, 12) sowie eine Einladung zu einem IREKA-Projekttreffen (QT1.3) an Shital Kale (Nr. 2), um den Meilenstein in diesem Teilvorhaben zu erfüllen und weitere

Schnittpunkte zwischen diesem Teilvorhaben in SEGIWA und dem Querschnittsthema QT1.3-IREKA zu diskutieren.

Es wurden weiterhin zwei Investitionen (850) getätigt, die auch so beantragt und genehmigt waren; einen Klapprohrföfen von HTM Reetz (6.923 €) und die dafür notwendigen Gas-Massendurchflussregler der Firma Bronkhorst (8.350 €). Die über Investition angeschafften Geräte werden nach Projektabschluss weiterhin für die nass-thermische Synthese von Katalysatormaterialien genutzt und auch in späteren Projekten eingesetzt.

### 3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten

Die Umsetzung der Nationalen Wasserstoffstrategie erfordert einen Ausbau der Elektrolysekapazitäten in den Gigawatt-Bereich. Die PEM-Wasserelektrolyse basiert jedoch auf Iridium als Anodenmaterial. Aufgrund der sich erschöpfenden Vorkommen und dem damit steigenden Preis des Iridiums wird ein Ausbau der PEM-Elektrolysekapazitäten langfristig nur möglich sein, wenn der Iridium-Einsatz signifikant reduziert wird.

In diesem Teilvorhaben stand die Hochskalierung der Synthese Iridium-armer Anodenkatalysatoren in Richtung industrielles Niveau sowie die Validierung der Iridium-armen Materialien im Industriekontext im Mittelpunkt der Arbeiten. Die Zurverfügungstellung von Anodenmaterialien mit niedrigerem Iridium-Anteil ist unerlässlich und notwendig für die Umsetzung der Ziele der Nationalen Wasserstoffstrategie. Da das Leibniz-Institut für Katalyse (LIKAT Rostock) das Projekt nicht mit eigenen Mitteln umsetzen kann, war eine Förderung unabdingbar. Es war daher wichtig, eine Finanzierung für die im Finanzierungsplan genannten Kosten zu erhalten. Die Zuwendung laut Finanzierungsplan war angemessen, da selbst die Suche nach Iridium-armen Materialien zunächst den Einsatz von teuren, Iridium-haltigen Salzen verlangt.

Daneben bestand trotz wirtschaftlicher und wissenschaftlicher Erfolgsaussichten ein wissenschaftlich-technisches Risiko bei der Umsetzung der Arbeitspakete. Die Komplexität des Forschungsvorhabens sowie die neuartigen Lösungsansätze bargen Risiken, die eine Förderung unabdingbar machten. Obwohl wir Expertise auf dem Gebiet der Wasserelektrolyse vorweisen können, waren wir auf diesem Gebiet international noch nicht so gut vernetzt, um eine EU-Förderung zu beantragen. Zukünftig sollen aber Projekte wie dieses sowohl auf unsere

Ergebnisse, z.B. durch Veröffentlichungen oder Vorträge, international aufmerksam machen und uns in die Lage versetzen ebenfalls EU-Förderung zu beantragen.

Die im Teilvorhaben synthetisierten und getesteten Iridium-armen Anodenkatalysatoren können als Alternativmaterial später im PEM-Elektrolyseur eingesetzt werden, so die Kosten senken und einen langfristigen Ausbau der Elektrolysekapazitäten mit ermöglichen.

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

Das Leibniz-Institut für Katalyse (LIKAT Rostock) wird als gemeinnütziges Forschungsinstitut keine wirtschaftliche Verwertung durchführen. Mit den Ergebnissen des Teilvorhabens gelang es jedoch, Iridium-arme Kathodenmaterialien in der Synthese hochzuskalieren und im praxisnahen Test vergleichbar gute Leistungen zu erzielen wie ein kommerziell erhältliches Material. Damit sind erste Schritte getan, um perspektivisch Elektrolyseure mit geringerem Iridium-Anteil herzustellen. Das senkt die Kosten und gewährleistet den langjährigen Einsatz der Technologie. Für eine Verwertung der bisherigen Ergebnisse im erwähnten Sinne müssen aber noch weitere Forschungen getätigt werden, wobei eine weitere Reduzierung des Iridium-Gehaltes oder sogar ein Ersatz des Iridiums erstrebenswert sind. Aber auch der Einbau in die MEA sowie der Betrieb des Stacks müssen an diese neuen Materialien angepasst bzw. die neuen Materialien den etablierten Betriebsweisen angepasst werden. Damit wäre dann erst ein weiterer Schritt in Richtung Ausbau der Elektrolysekapazitäten in den Gigawatt-Bereich getan. Die Ergebnisse der Arbeit im Teilvorhaben als auch mit den Verbundpartnern werden nunmehr in Form von Veröffentlichungen in renommierten Fachzeitschriften sowie Vorträgen auf nationalen und internationalen Konferenzen verwertet.

Das LIKAT erweiterte mit der Realisierung des Forschungsvorhabens seine Kompetenzen auf dem Gebiet der PEM-Wasserelektrolyse, der elektrochemischen Wasseroxidation und der Hochskalierung der Katalysatorsynthese. Damit ergibt sich kurzfristig die Chance, in einer immer bedeutsamer werdenden Thematik international beachtete Forschung zu betreiben und in Veröffentlichungen zu dokumentieren.

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

Dem Projektteam und den Verbundpartnern sind keine bemerkenswerten Fortschritte bzw. Veröffentlichungen auf dem Gebiet des Projektes während der Projektlaufzeit bekannt geworden. Obwohl das Gebiet des Teilvorhabens weltweit sehr beachtet und beforscht wird, gelang bis jetzt noch keiner Forschergruppe ein revolutionärer Durchbruch. Als hilfreich erwiesen sich aber kürzlich erschienene Publikationen zum Mechanismus der sauren Wasser-Oxidation und zum Einsatz von Ruthenium als teilweiser Ersatz des Iridiums.

- Merwe, M. v. d., Wibowo, R. E., Jimenez, C. E., Escudero, C., Agostini, G., Bär, M., Garcia-Diez, R.; Electronic and Structural Property Comparison of Iridium-Based OER Nanocatalysts Enabled by Operando Ir L3-Edge X-ray Absorption Spectroscopy. ACS Catal. 2024, 14, 16759-16769.
- Sharma, S.K., Wu, C., Malone, N., Titheridge, L. J., Zhao, C., Gupta, P., Idriss, H., Kennedy, J. V., Jovic, V., Marshall, A.T.: Ru-based catalysts for proton exchange membrane water electrolyzers: The need to look beyond just another catalyst. Int. J. Hydrogen Energy 2025, 102, 1461.

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

Im Rahmen des Verbundprojektes planen LIKAT und HS eine gemeinsame Publikation.

Datum	Art der Veröffentlichung	Titel, Quelle/Zitat (Journal, Konferenz)	Autoren	Link
09.11.2023	Konferenz-Vortrag	30. REGWA Energie-Symposium 2023, Stralsund „IREKA und SEGIWA - Iridium-reduzierte Anodenkatalysatoren für die PEM-Wasserelektrolyse“	<u>Annette-E. Surkus</u>	
27.05.2024	Konferenz-Poster	245th ECS-Meeting, San Francisco, US „Low Ir-Containing Materials as Anode Catalysts for PEM Water Electrolysis“	<u>Annette-E. Surkus</u> , Trang M. Pham	DOI: 10.1149/MA2024-01341760mtgabs
18.09.2024	Konferenz-Poster	GdCh-Electrochemistry 2024, Braunschweig „Low Ir-Content Materials as Anode Catalysts for PEM Water Electrolysis“	Trang M. Pham, <u>Annette-E. Surkus</u>	
26.08.2025	Konferenz-Poster	5 <sup>th</sup> International Conference on Electrolysis (ICE), Freiburg “Low Iridium-Content Materials as Anode Catalyst for PEM Water Electrolysis	Trang M. Pham, Clara Schare, Carolin Klose, <u>Annette-E. Surkus</u>	