

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt,  
gefördert unter dem AZ 38076/01 von der  
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

# **Ökonomische Herstellung von Wasserstoff mit Hilfe von kubischem Siliciumcarbid**

## **„3C-SiC Photokatalyse“**

von

Prof. Dr. Siegmund Greulich-Weber

Berlin, Dezember 2023



The Yellow SiC Development GmbH

Schwarzschildstraße 1

12489 Berlin

## Inhaltsverzeichnis

|  |    |
|--|----|
| Verzeichnis von Bildern, Zeichnungen, Grafiken und Tabellen..... | 3  |
| Verzeichnis von Begriffen, Abkürzungen und Definitionen.....     | 4  |
| Zusammenfassung.....   | 5  |
| Einleitung.....  | 6  |
| Projektverlauf.....  | 10 |
| Projektplan.....   | 10 |
| Maximierung der Elektrodenoberfläche.....                        | 10 |
| Dotierung der SiC-Elektroden.....                                | 13 |
| Charakterisierung der Elektrodenmaterialien.....                 | 14 |
| Aktueller Stand.....   | 18 |
| Photokatalysezellen.....   | 19 |
| Optimierung der technischen Auslegung.....                       | 21 |
| Fazit.....   | 22 |
| Literaturverzeichnis.....  | 22 |

## Verzeichnis von Bildern, Zeichnungen, Grafiken und Tabellen

|   |    |
|---|----|
| Abb. 1: Parametervergleich verschiedener Elektrolyseure. ....                   | 8  |
| Abb. 2: Photokatalytische Wasserspaltung .....                                  | 9  |
| Abb. 3: Carbon-Ausgangsmaterial. ....   | 11 |
| Abb. 4: 3C-SiC-Elektroden für die elektrolytische Wasserspaltung. ....          | 11 |
| Abb. 5: Mikroskopische Aufnahmen von 3C-SiC-Oberflächen. ....                   | 12 |
| Abb. 6: Einfallendes Licht auf eine 3C-SiC-Oberfläche. ....                     | 13 |
| Abb. 7: Stickstoffdotierte 3C-SiC-Elektroden. ....                              | 14 |
| Abb. 8: Eine Reihe unterschiedlich Stickstoff-dotierter 3C-SiC Elektroden. .... | 14 |
| Abb. 9: Strom-Spannungs-Kennlinien verschiedener Elektrodenpaare. ....          | 15 |
| Abb. 10: Überspannungen verschiedener Elektrodenmaterialien.....                | 16 |
| Abb. 11: Analytik.....  | 16 |
| Abb. 12: Strom-Spannungskennlinien einer 3C-SiC Elektrode.....                  | 17 |
| Abb. 13: Analyse der Flüssigkeits- und Gasströme. ....                          | 18 |
| Abb. 14: Schottky-Übergang. ....  | 18 |
| Abb. 15: Drei-Photonen-Übergang. ....   | 19 |
| Abb. 16: Einmalzelle.....   | 20 |
| Abb. 17: Finale Laborzelle. ....  | 21 |
| Abb. 18: Entwurf Skalierung. ....   | 22 |

## Verzeichnis von Begriffen, Abkürzungen und Definitionen

|               |                                    |
|---------------|------------------------------------|
| <b>AEL</b>    | alkalische Elektrolyse             |
| <b>At.</b>    | Atome                              |
| <b>CFK</b>    | carbonfaserverstärkten Kunststoff  |
| <b>GDMS</b>   | Glow discharge mass spectrometry   |
| <b>KOH</b>    | Kaliumhydroxid                     |
| <b>NHE</b>    | Normal Hydrogen Electrode          |
| <b>PEC</b>    | Photoelektrokatalytische Zelle     |
| <b>PEM</b>    | Proton Exchange Membrane           |
| <b>ppm</b>    | parts per million                  |
| <b>SiC</b>    | Siliziumkarbid                     |
| <b>VIS/UV</b> | sichtbares/ultraviolettes Licht    |
| <b>XRD</b>    | X-Ray Diffraction (Röntgenbeugung) |
| <b>[N]</b>    | Stickstoffkonzentration            |

## Zusammenfassung

Die Herstellung von grünem Wasserstoff ist aktuell noch sehr kostenintensiv und kann wirtschaftlich mit fossilen Brennstoffen nicht konkurrieren. Im Fokus stehen derzeit Elektrolyseverfahren, die durch Verwendung von „grünem elektrischen Strom“ Wasserstoff erzeugen. Dieses mehrstufige Verfahren ist verlustbehaftet und moderne, effiziente Elektrolyseure verwenden seltene und extrem teure Elektrodenmaterialien. Hier setzt das Projekt an. Es werden Elektroden aus Siliziumkarbid (SiC) hergestellt, da dieses Material bekannt für seine extreme Härte und hohe chemische Stabilität ist. Es wurde ein Verfahren entwickelt, welches eine kostengünstige Herstellung nahezu beliebig großer SiC-Elektroden erlaubt. In diesem Projekt wurde zunächst das Herstellungsverfahren weiterentwickelt, um die Oberfläche der Elektroden zu maximieren und eine möglichst hohe Wasserstoffproduktion zu gewährleisten. In weiteren Schritten wurde die Leitfähigkeit der SiC-Elektroden durch gezielte Dotierung des Materials verbessert. Auf der Wasserstoffseite (Kathode) wird n-leitendes SiC benötigt, welches durch eine hohe Stickstoffkonzentration als Donator realisiert werden kann. Auf der Sauerstoffseite wird p-leitendes SiC verwendet, welches z. B. durch eine Aluminium-Dotierung erreicht wird. Durch eine omnipräsente Stickstoffverunreinigung in SiC wird die Aluminiumdotierung kompensiert, so dass die Hauptaufgabe zunächst die einer Stickstoffreduktion in SiC war. Die angestrebte Stickstoffkonzentration von ca. 1ppm konnte erst mit dreimonatiger Verzögerung erreicht werden, da der hierfür vorgesehene Reaktor mit 6-monatiger Verspätung geliefert wurde. Die bislang ermittelten elektrischen Parameter zeigen, dass dotiertes SiC eine Alternative zu den bislang eingesetzten Materialien ist. Langzeittests stehen noch aus. Für photokatalytische Anwendungen ist unbedingt der SiC-Polytyp 3C (kubisch) wegen der hierfür optimalen Bandlücke notwendig. Dieser Polytyp ist kommerziell nicht verfügbar, aber mit dem hier entwickelten Verfahren beliebig herstellbar. Erste Experimente mit n- und p-dotiertem 3C-SiC haben bereits gezeigt, dass ohne weitere Hilfsmittel hier eine Photokatalyse selbstständig abläuft. Das 3C-SiC wird im Folgenden hinsichtlich Dotierung und Oberfläche, sowie Materialdicke weiter optimiert.

Eine weitere Aufgabe in diesem Vorhaben ist die Konstruktion und Herstellung von Photokatalyse Laborzellen. Hierfür wurde ein modulares Konzept gewählt, welches einen leichten Elektrodentausch im Labor erlaubt und die Bestimmung von Parametern, wie z. B. Strom zwischen den Elektroden und Beleuchtung mit spektraler Auflösung. In einer Konzeptstudie wurde ein Zelldesign entwickelt, welches ohne elektrische Verbindungen eine Skalierung der Photokatalysezellen erlaubt. Diese Zellen sind ebenfalls bereits im Laboreinsatz.

Das Vorhaben wurde durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt unter dem Aktenzeichen AZ 38076 „3C-SiC Photokatalyse“ gefördert.

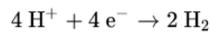
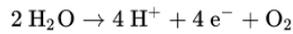
## Einleitung

Um die Energiewende erfolgreich zu gestalten und zügig voranzubringen, sind große Anstrengungen notwendig. Insbesondere sind Lösungen gefragt, die ausgesprochen ökonomisch sind. Der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien gehört die Zukunft. Jedoch gibt es nach wie vor eine Reihe von Bereichen, die aktuell noch von fossilen Energieträgern abhängig sind, wie beispielsweise die Eisen- und Stahlerzeugung oder auch Teile des Verkehrssektors wie Schiffs-, LKW- und Flugverkehr. In all diesen Bereichen stellt grüner Wasserstoff eine umweltfreundliche Alternative zu fossilen Brennstoffen dar. Das Gas ist ein „Schlüsselrohstoff für eine erfolgreiche Energiewende“. Die Industrie unterstützt diesen Kurs: Turbinenbauer rüsten ihre Produkte ebenso auf reinen Wasserstoffbetrieb um, wie Stahlunternehmen ihre Hochöfen. Automobilbauer forcieren die Entwicklung von Brennstoffzellenantrieben und beteiligen sich am Aufbau eines Tankstellennetzes. Und der Chemieverband VCI erklärt den Einsatz von grünem Wasserstoff zur Treibhausgasminderung in seiner Roadmap 2050 für „alternativlos“. Die Herstellung von grünem Wasserstoff ist aktuell jedoch noch sehr kostenintensiv und kann wirtschaftlich mit fossilen Brennstoffen nicht konkurrieren. Derzeit werden weltweit nur rund 1 % des Wasserstoffs mittels Elektrolyse hergestellt (inkl. aus erneuerbaren Energien). Im Vergleich dazu liegt der Anteil des aus Erdgas reformierten Wasserstoffs bei 41 %, gefolgt vom durch Schweröl gewonnenen Wasserstoff mit 21 %. Es ist daher dringend notwendig, elektrolytische Herstellungsverfahren für Wasserstoff und insbesondere grünen Wasserstoff wirtschaftlicher zu machen, entweder durch Effizienzsteigerung, durch Senkung der Herstellungskosten oder im besten Fall durch beides.

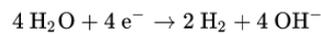
Hier setzt das geplante Projekt an. An der Universität Paderborn ist es durch jahrelange Forschungsarbeit gelungen, ein neues Verfahren für die Herstellung von kubischem Siliciumcarbid (3C-SiC) zu entwickeln, das deutliche Kostenvorteile bei der Erzeugung von Wasserstoff verspricht. Das wegen seiner gelben Farbe von den Antragstellern „Yellow-SiC“ genannte 3C-SiC hat gegenüber dem bisher bekannten hexagonalen Siliciumcarbid enorme Vorteile, sowohl hinsichtlich seiner technischen Eigenschaften als auch der Herstellungskosten. Im geplanten Projekt sollen Yellow-SiC beschichtete Elektroden für die Wasserstoffelektrolyse entwickelt werden. Diese 3C-SiC-Elektroden sollen im Ergebnis leistungsfähiger, langlebiger und günstiger in der Herstellung sein als bisher am Markt übliche Produkte. Auf Grundlage dieser Ergebnisse soll ein neues System der Wasserstoff-Photokatalyse entwickelt werden, welches einen weitaus höheren und damit wirtschaftlichen und marktfähigen, Wirkungsgrad aufweist als aktuelle Systeme.

Siliciumcarbid (SiC) kommt auf der Erde so gut wie nicht natürlich vor (außer in Moissanit, einem seltenen Meteoriten-Mineral). Dementsprechend muss es hergestellt werden, was mit großem Energieeinsatz verbunden ist. Es ist im Aufbau und den Eigenschaften ähnlich zum Diamanten, da sich Silicium und Kohlenstoff in derselben Hauptgruppe und benachbarten Perioden des Periodensystems befinden und die Atomdurchmesser ähnlich sind. Eine Besonderheit von SiC ist der Polytypismus, es existiert in vielen verschiedenen Phasen, die sich in ihrer atomaren Struktur unterscheiden. Es kristallisiert in über 200 Modifikationen, von denen die beiden hexagonalen Formen 4H und 6H-SiC im kommerziellen Bereich am meisten verbreitet sind. Ein typischer Anwendungsbereich von SiC sind Halbleiter – Halbleiter auf Basis von SiC verarbeiten Strom in einigen Bereichen effizienter als herkömmliche Halbleiter. Eine Form des SiC, welches sich besonders gut als Halbleiter eignet, ist das kubische SiC (3C-SiC), das sich bisher jedoch in reiner Form nicht in großem und wirtschaftlichem Maßstab herstellen lässt. Auf dem Markt befindliches SiC liegt oft in verunreinigter Form vor, dementsprechend muss es erst aufwendig gereinigt werden, um es als Halbleitermaterial verwenden zu können. Das von dem Antragsteller entwickelte Herstellungsverfahren ermöglicht es zum ersten Mal, reines 3C-SiC in großen Mengen wirtschaftlich herstellen zu können. Damit wird es auch erstmals interessant für kommerzielle Anwendungen im Halbleiterbereich.

Die Wasserstoffelektrolyse, kurz auch Wasserelektrolyse, ist ein Verfahren zur Aufspaltung von Wasser in seine beiden Bestandteile Wasserstoff (H) und Sauerstoff (O<sub>2</sub>) mit Hilfe eines elektrischen Stroms nach folgender Formel:



Der elektrische Energiebedarf zur Herstellung von 1 Kubikmeter Wasserstoff im Normzustand definiert den Wirkungsgrad eines Elektrolyseurs. Im Regelfall liegt der Wirkungsgrad zwischen 60 und 70 % (bezogen auf den unteren Heizwert von Wasserstoff), vereinzelt Anlagen erreichen heute schon über 80 %. Es gibt verschiedene Arten der Wasserelektrolyse, die heute gebräuchlichste Art ist die alkalische Elektrolyse (AEL) mit folgender Reaktionsgleichung:



Die AEL verwendet Metallelektroden, in der Regel Titanelektroden mit einer Rutheniumoxid-Beschichtung, die in eine alkalische wässrige Lösung eingetaucht werden. Die Halbzellen, in denen die Elektroden hängen, werden durch eine permeable Membran getrennt (Diaphragma). Als Elektrolyt dient Kalilauge (Kaliumhydroxid-Lösung, KOH) mit einer Konzentration von 20 - 40 %. Diese Methode gilt als recht kostengünstig, da z. B. für das Elektrodenmaterial keine Edelmetalle benötigt werden.

Ein weiteres Verfahren zur Wasserelektrolyse ist die Protonen-Austausch-Membran-Elektrolyse (PEM) oder „saure“ Elektrolyse. Im Gegensatz zur alkalischen Elektrolyse arbeitet dieses Verfahren im sauren Milieu mit destilliertem Wasser als Elektrolyt. Dadurch wird für die Elektroden der Einsatz von Edelmetallen notwendig, um Korrosion zu vermeiden (Platin, Iridium, Ruthenium). Die Trennung der beiden Halbzellen erfolgt durch eine gasdichte Membran. Der große Vorteil dieser Technologie ist das gute Lastwechselverhalten. Im Vergleich zu anderen Verfahren kann hier schneller auf schwankende Strommengen eingegangen werden. Darüber hinaus ist der Betrieb im Teillastbereich über die gesamte Bandbreite möglich. Da es sich hierbei jedoch noch um eine relativ neue Technologie handelt, die aktuell nur einen kleinen Marktanteil hat, und die verwendeten Materialien kostenintensiv sind, sind die Investitionskosten höher als bei der alkalischen Elektrolyse.

Neuere Forschungen und Entwicklungen befassen sich mit Hochtemperatur-Elektrolyseuren, die mit Temperaturen zwischen 100 und 850 °C arbeiten, wie z. B. die Solid-Oxid-Elektrolyse (SOEC). Diese Systeme benötigen weniger elektrische Energie als die zuvor genannten, weil ein Teil der notwendigen Energie durch Wärme zugeführt wird. Da diese Wärmezufuhr in der Regel günstiger ist als die elektrische Energie (z. B. Abwärme aus anderen Prozessen), ist diese Art der Elektrolyse wirtschaftlicher. Demgegenüber stehen aber auch eine Reihe von Nachteilen. Zum einen müssen günstige CO<sub>2</sub>-neutrale Wärme-Energiequellen zur Verfügung stehen (z. B. aus Solar- oder Geothermie) und zum anderen liegen die Investitionskosten heute noch deutlich über denen alkalischer Elektrolyseure. Hinzu kommt der für die Verwendung von fluktuierendem Strom im Vergleich zur alkalischen oder PEM-Elektrolyse schmalere Betriebsbereich sowie die aufgrund der hohen thermischen Spannungen unvermeidbaren Materialbeanspruchungen bei Lastwechseln. Ferner kann die für den Betrieb notwendige hohe Temperatur lange Aufheizphasen bedingen, sodass die Aktivierungszeit aus dem Stillstand relativ lang ausfällt. Nachfolgende Tabelle gibt einen vergleichenden Überblick der einzelnen Verfahren auch mit zukunftsprognostischen Daten.

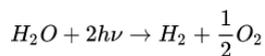
Um die Effizienz bekannter Elektrolyse-Systeme zu erhöhen, gibt es auch Forschungen im Bereich einzelner Bauteile. So haben z. B. Forscher der Fraunhofer-Institute HHI und IFAM gemeinsam mit Experten von Amphos und weiteren Partnern im Förderprojekt GreenH2 nachgewiesen, dass die Effizienz der Elektrolyse deutlich zunimmt, wenn Ultrakurzpuls-(UKP)-Laser die metallischen Elektroden strukturieren, um deren elektrochemisch aktive Oberfläche zu vergrößern. Zudem nehmen die Langzeitstabilität und elektrische Leitfähigkeit der UKP-strukturierten Elektroden zu. Um die Effizienz bekannter Elektrolyse-Systeme zu erhöhen, gibt es auch Forschungen im Bereich einzelner Bauteile. So haben z. B. Forscher der Fraunhofer-Institute HHI und IFAM gemeinsam mit Experten von Amphos und weiteren Partnern im Förderprojekt GreenH2 nachgewiesen, dass die Effizienz der Elektrolyse deutlich zunimmt, wenn Ultrakurzpuls-Laser die metallischen Elektroden strukturieren, um deren elektrochemisch aktive Oberfläche zu vergrößern. Zudem nehmen die Langzeitstabilität und elektrische

|                                    |                       | Alkali-<br>elektrolyse | PEM-<br>Elektrolyse | Solid-Oxid-<br>Elektrolyse |
|------------------------------------|-----------------------|------------------------|---------------------|----------------------------|
| Wirkungsgrad in %                  | 2020                  | 65                     | 63                  | 81                         |
|                                    | 2030                  | 68                     | 63                  | 83                         |
|                                    | 2050                  | 69                     | 68                  | 83                         |
| Stromdichte                        | in A/cm <sup>2</sup>  | 0.2 – 0.5              | 2                   | 0.46 – 1.3                 |
| Verfügbare Anlagenleistungsbereich | in MW                 | Bis 130                | Bis 6               | 0.018                      |
| Temperaturbereich                  | in °C                 | 50 - 80                | 50 - 80             | 600 – 900                  |
| Lastgradient                       | in %/s                | <1                     | 10                  | 5.7                        |
| Produktionsraten pro Einheit       | in Nm <sup>3</sup> /h | 1000460                | 5.7                 |                            |
| Lebensdauer                        | in h                  | bis zu 90 000          | bis zu 50 000       | -                          |

Abb. 1: Parametervergleich verschiedener Elektrolyseure.

(Quelle: Forschungsstelle für Energiewirtschaft e. V. und Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft bmH)

Leitfähigkeit der UKP-strukturierten Elektroden zu. In die gleiche Richtung zielt das vorliegende Projekt ab. Im Gegensatz zu (teureren) Metallelektroden soll hier jedoch die Optimierung mit Hilfe der 3C-SiC-Elektroden erfolgen, was sich kostengünstiger und mit einem vermutlich noch höheren Optimierungspotential realisieren lassen wird. Neben den oben beschriebenen Elektrolyseuren gewinnt ein weiteres Verfahren, die Photokatalyse, zunehmend an Bedeutung bei der Herstellung grünen Wasserstoffs. Bei der Wasserstoff-Photokatalyse handelt es sich um eine Sonderform der Elektrolyse, bei der die zur Aufspaltung des Wassers notwendige Energie durch Sonnenlicht erzeugt wird und keine externe Stromquelle erforderlich ist. Die Reaktion lässt sich wie folgt beschreiben:



Der Vorteil der Photokatalyse gegenüber anderen Techniken wie der Elektrolyse besteht darin, dass Ladungstrennung und Spaltung des Wassers von einem Material an der gleichen Grenzfläche durchgeführt werden kann, wodurch Übertragungsverluste minimiert werden können und Material gespart werden kann. Um die Wasserspaltung mittels Sonnenlicht zu ermöglichen, muss eine Spannung von mindestens 1.23 V zwischen Anode und Kathode aufgebaut werden. Das entspricht der Energie, die aufgewendet werden muss, um ein Wasserstoffatom von einem Sauerstoffatom zu trennen. In der Praxis ist die benötigte Spannung jedoch höher, typischerweise im Bereich von 1.6 bis 2.4 V, was sich auf eine starke Bindung während der Reaktion an den Katalysator sowie auf Leitungsverluste zurückführen lässt.

Ein schon seit langem bekannter direkter Weg führt über die Halbleiterphotokatalyse. Dabei wird die für eine Wasserspaltung notwendige Energie durch die Photospannung eines Halbleiter-überganges bereitgestellt. Damit an der Gegenkathode die H<sub>2</sub>-Produktion stattfinden kann, muss das Leitungsband höher und damit negativer liegen als das Reduktionspotential von H<sub>2</sub>O → H<sub>2</sub> (E<sub>0</sub> = 0). Außerdem muss das Valenzband an der Anode positiver liegen als das Oxidationspotential von H<sub>2</sub>O → O<sub>2</sub> (E<sub>0</sub> = +1.23 V). Die mit dem Halbleiter erreichbare Photospannung (Aufspaltung der Quasi-Ferminiveaus) muss größer sein als die zur Elektrolyse notwendige Spannung. Diese setzt sich aus der thermodynamischen Zersetzungsspannung, der zur Erzielung einer bestimmten Stromdichte notwendigen Diffusionsüberspannung, einer für die Grenzfläche des speziellen Halbleitermaterials jeweils charakteristischen kinetischen Überspannung und der Spannungen zusammen, die an den im elektrischen Kreis auftretenden Widerständen (bes. im Elektrolyten, im Halbleiter und an den Kontakten) abfallen. Nach Aufbau der Photospannung muss noch eine Bandverbiegung bestehen bleiben, damit das damit verbundene elektrische Feld die bei Belichtung gebildeten Elektron/Loch-Paare räumlich trennen und eine Rekombination verhindern kann (Abb. 2). Ferner kann wegen der nicht vermeidbaren strahlenden Rekombination die Photospannung (Aufspaltung der Quasi-Ferminiveaus) nur einen kleineren Wert erreichen als der Bandlücke entspricht. Diesen Einschränkungen, die dazu führen, dass die Photospannung nur einen um etwa 0.5 eV kleineren Wert erreichen kann als der Bandlücke entspricht, unterliegen Festkörpersolarzellen in gleicher Weise. Um eine Ladungsübertragung zum Elektrolyten zu ermöglichen, müssen die Bandkanten an der Grenzfläche zum Elektrolyten geeignete Energien

Photokatalytische Wasserspaltung in Photoelektrochemischen Zellen (PEC)  
PEC sind Solarzellen und wandeln sichtbares Licht in chemische Energie um.

$4h^+ + 2H_2O \rightarrow O_2 + 4H^+$   
an der Halbleiterelektrode  
 $4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2$  an der Gegenelektrode  
(oder n-Typ Halbleiter als Gegenelektrode)

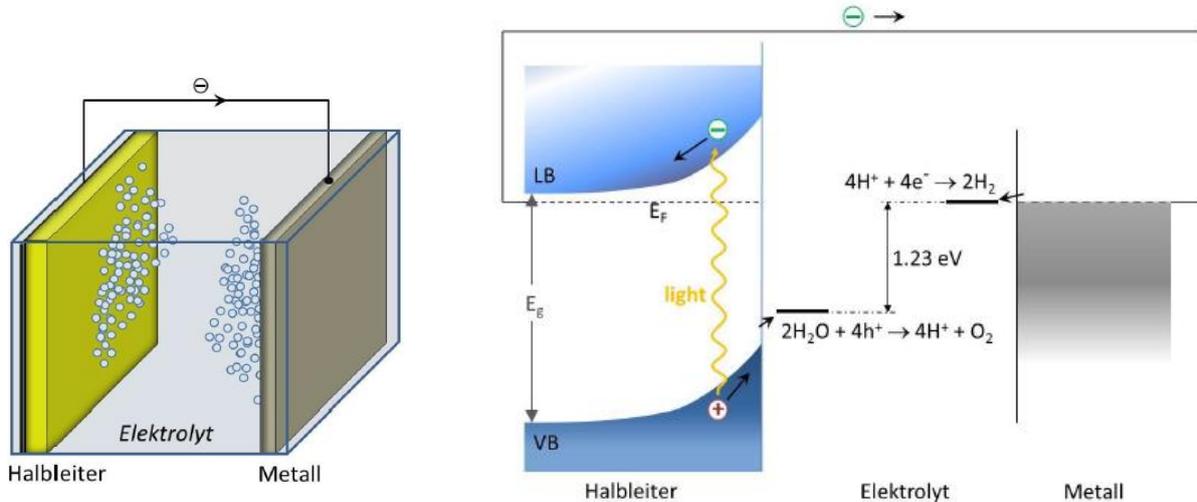


Abb. 2: Photokatalytische Wasserspaltung

zu ermöglichen, müssen die Bandkanten an der Grenzfläche zum Elektrolyten geeignete Energien besitzen. Für die Wasserreduktion muss das Leitungsband so weit oberhalb (kathodisch) vom Reduktionspotential des Wassers (Wasserstoff-Potential, in neutraler Lösung  $-0.42 \text{ eV}$  (NHE)) und das Valenzband so weit unterhalb des Oxydationspotentials des Wassers (Sauerstoff-Potential, in neutraler Lösung  $+0.81 \text{ eV}$  (NHE)) liegen, dass die beiden obigen Bedingungen noch erfüllt werden können (Abb. 2). Der Gesamtprozess ist nach heutigem technischem Stand höchst verlustbehaftet. Der Wirkungsgrad liegt bei nur ca. 10 %. Aus diesem Grund befindet sich das Verfahren heute noch nicht in praktischer Anwendung.

Durch den starken Ausbau der Nutzung von erneuerbaren Energien wird davon ausgegangen, dass die Wasserelektrolyse als Bestandteil von Power-to-Gas-Anlagen mittel- bis langfristig eine große Bedeutung zur Herstellung von Synthesegas erreichen wird. Mit Wasserstoff als Energiespeicher wird die Verstärkung der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien, insbesondere bei Windkraft und Photovoltaik, gefördert, indem Überschüsse von Wind- und Solarstrom chemisch zwischengespeichert werden können. Der erzeugte Wasserstoff kann für chemische Prozesse genutzt oder direkt nach anschließender Methanisierung als Methan dem Erdgasnetz zugeführt werden. Anschließend steht er für verschiedene Anwendungszwecke wie z. B. als Rohstoff für die chemische Industrie (Power-to-Chemicals), als Antriebsenergie von Fahrzeugen, Schiffen und Flugzeugen (Power-to-Fuel) oder für die Rückverstromung in Gaskraftwerken oder Brennstoffzellen zur Verfügung. Jedoch ist die Erzeugung von grünem Wasserstoff heute noch zu teuer und der Wirkungsgrad zu gering, um einen raschen Ausbau der Technologie zu ermöglichen. Ferner zielen viele der aktuellen Projekte zur Erzeugung grünen Wasserstoffs eher auf großtechnische Anlagen ab.

Das Projekt verfolgt mehrere umweltrelevante Ziele. Zum einen sollen die zu entwickelnden 3C-SiC-Elektroden den Wirkungsgrad von Wasserelektrolyseanlagen verbessern, gleichzeitig kostengünstiger sein, als das zurzeit verwendete Elektrodenmaterial und damit einen wertvollen Beitrag zur ökonomischeren Erzeugung von grünem Wasserstoff beitragen. Die im Projekt angestrebte Steigerung des Wirkungsgrads der Photokatalyse auf 35 % soll es erstmals ermöglichen, diese Form der Wasserstoffherzeugung kommerziell umsetzen zu können. Es soll ein völlig neues System zur photokatalytischen Wasserstoffherzeugung in Verbindung mit der Nutzung der solartthermischen Energie entwickelt werden, das sich kostengünstig herstellen lässt. Damit sollen später im Gegensatz zu vielen anderen technischen Ansätzen vor allem auch Anwendungsfelder im dezentralen B-to-C-Bereich umgesetzt werden (z. B. im privaten Immobilienbereich).

# Projektverlauf

## Projektplan

Zu Beginn steht die Materialoptimierung im Fokus. Ziel ist es, durch Auswahl von unterschiedlichem CFK-Plattenmaterial und anschließender Umwandlung in 3C-SiC Material (Conversion) die Oberfläche der Elektroden zu maximieren und damit die Leistungsfähigkeit weiter zu erhöhen. Die Maximierung der Oberfläche muss dabei mit einer größtmöglichen mechanischen Stabilität der Elektroden in Einklang gebracht werden.

Im Weiteren sollen mit Hilfe geeigneter Dotierungen (p, n) beide Elektroden in der Wasserelektrolyse durch 3C-SiC-Material ersetzt werden können. Dies ist wichtig für die später notwendige Weiterentwicklung zu einer Doppelektrode in der Photokatalyse, die dort aus bautechnischen Gründen der Photokatalysezelle notwendig ist. Um die „beste“ Dotierung und die optimale Konzentration der Dotanten zu finden, werden verschiedene Analysemethoden eingesetzt. Diese Dotierungsoptimierung findet in AP1 und AP2 statt. In AP2 wird eine Photokatalysezelle optimiert und als Prototyp im Labor aufgebaut.

|   |                          |
|---|--------------------------|
| AP 1  | Dotierung der Elektroden |
| Zeitraumen  | 6 Monate                 |
| Aufgaben:   |                          |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>- Dotierung (n, p)</li> <li>- Analyse der erreichten Dotierung hinsichtlich Leitfähigkeit und Elektrolyseverhalten in nanokristallinen 3C-SiC-Fasern und amorphen 3C-SiC-Fasern</li> </ul> |                          |

|  |                               |
|--|-------------------------------|
| AP 2   | Design SiC-Photokatalysezelle |
| Zeitraumen   | 12 Monate                     |
| Aufgaben:  |                               |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>- Technisches Design der Zelle</li> <li>- Materialauswahl (Gehäuse, Elektroden, Leitungen etc.)</li> <li>- Montage und Einsatz in Laboranlage</li> <li>- Weitere Optimierung der Elektroden durch entsprechende Dotierung</li> <li>- Analyse der Flüssigkeits- und Gasströme</li> <li>- Analyse der Testergebnisse</li> <li>- Optimierung der technischen Auslegung auf Basis der Forschungsergebnisse</li> </ul> |                               |

## Maximierung der Elektrodenoberfläche

Ein Ziel des Projektes (AP1) ist die Optimierung der 3C-SiC-Elektroden für die photoelektrokatalytische Wasserspaltung durch Maximierung der aktiven Oberfläche und durch Volumen-Dotierung.

In den Voruntersuchungen wurde kein Unterschied zwischen SiC-transformierten Stickstoff-dotierten Kohlenstofffaserplatten und identisch behandelten Graphitplatten hinsichtlich der elektrischen Eigenschaften und dem Elektrolyseverhalten festgestellt.

Im Verlaufe der Untersuchungen in AP 1, insbesondere in Lichtenregungsexperimenten, wurde aber festgestellt, dass SiC-transformierte mikroporöse Graphitplatten hinsichtlich ihrer elektrischen und optischen Eigenschaften deutlich vorteilhafter sind. Zum einen betrifft das die Eindringtiefe des Lichts (siehe unten), zum anderen die tatsächlichen Weglängen der erzeugten Ladungsträger durch die Elektrode. Die Strompfade verlaufen eher entlang der Fasern der Faserplatte, was bei einem Zweielektrodensystem von Vorteil ist, bei einer Doppelektrode aber weniger effektiv ist. Da, wie unten

beschrieben, die Dotierstoffkonzentration nicht zu hoch sein darf, sollte auf Basis der Voruntersuchungen in den 10  $\mu\text{m}$  dicken Fasern ein Kohlenstoffkern als leitfähiger Kanal für die Ladungsträger verbleiben. Der Kohlenstoffkern beeinträchtigt jedoch die Eindringtiefe des Lichts.

Des Weiteren hat sich bei der unten beschriebenen Stickstoffreduktion im SiC herausgestellt, dass die Bindemittel der Faserplatten ein ungewollter Stickstofflieferant während der SiC-Transformation sind und damit eine p-Dotierung nur schwer erreichbar wird.



Abb. 3: Carbon-Ausgangsmaterial.

Links: Carbonfaserplatten, rechts Graphitplatten. Die Abmessungen betragen jeweils 40 x 40 mm<sup>2</sup>.

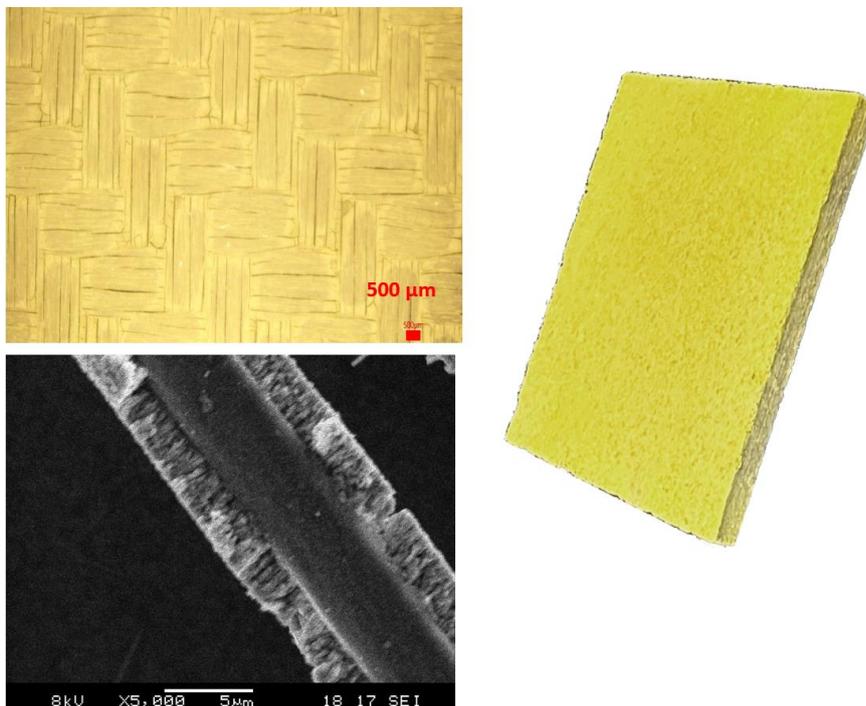
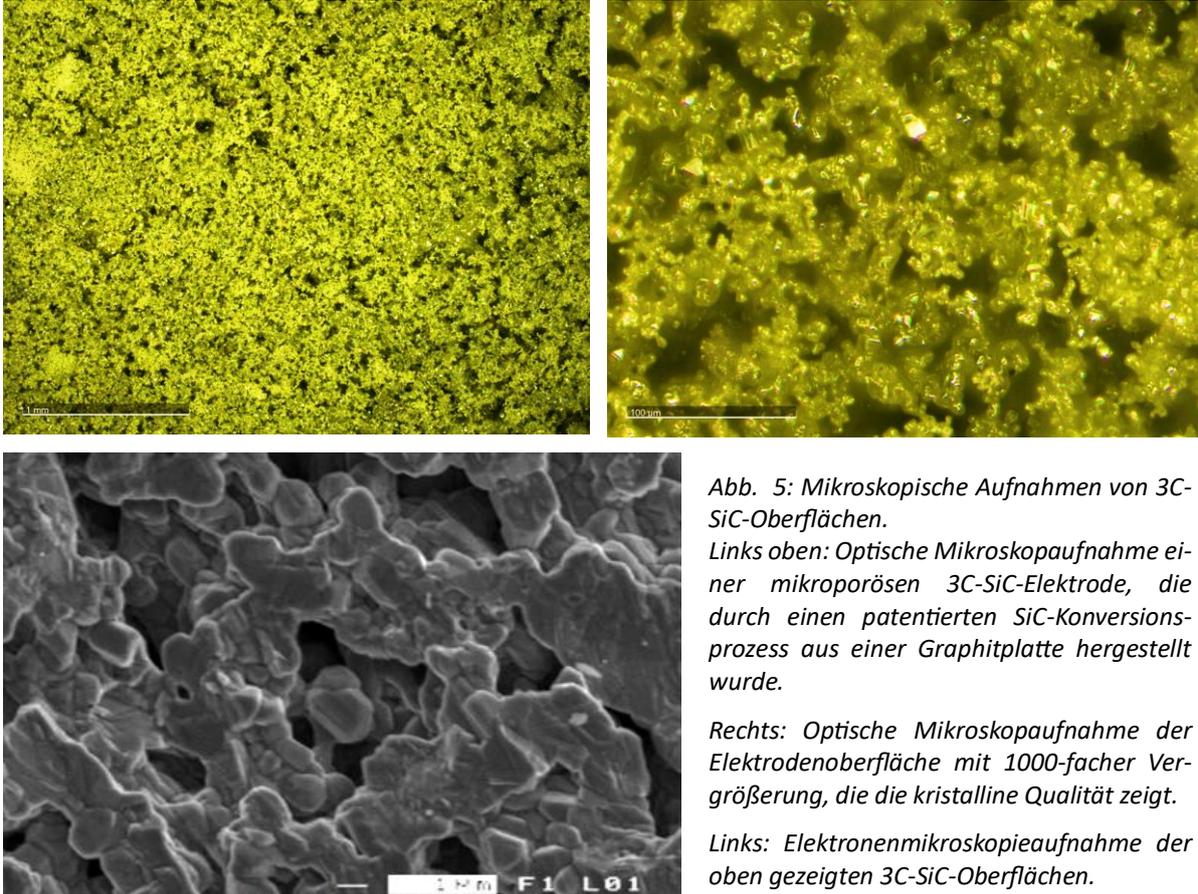


Abb. 4: 3C-SiC-Elektroden für die elektrolytische Wasserspaltung.

Links oben: 3C-SiC-Faserplatte aus Carbonfaserplatte in Abb. 3 hergestellt. Links unten: Elektronenmikroskopieaufnahme einer Carbonfaser aus der Carbonfaserplatte. Rechts: 3C-SiC Platte aus Graphitplatte (Abb. 3) hergestellt.

In AP 1 wurden beide Elektrodenmaterialien, auch unterschiedlicher Hersteller, parallel bearbeitet. Im Folgenden werden vorzugsweise Ergebnisse zu SiC-transformierten Graphitplatten dargestellt.

Eine Erhöhung der Gasproduktion mittels optimierter, strukturierter Oberfläche ist nicht allein durch ein großes geometrisches Oberflächen-Volumen-Verhältnis erreichbar. Die Eindringtiefe von Licht mit einer Energie, die größer als die Bandlücke von 3C-SiC ist, beträgt etwa 150  $\mu\text{m}$ . In perfekten 3C-SiC-Einkristallen ist die Lebensdauer der durch Sonnenlicht erzeugten Elektronen und Löcher so hoch, dass diese eine Strecke von etwa 30  $\mu\text{m}$  zurücklegen können, bevor sie rekombinieren. Ladungsträger, die z. B. in einer Tiefe von 50  $\mu\text{m}$  erzeugt werden, tragen nicht zur Gasproduktion bei, da sie vor Erreichen der SiC-Oberfläche rekombinieren (siehe Abb. 6 (links)).



*Abb. 5: Mikroskopische Aufnahmen von 3C-SiC-Oberflächen.*

*Links oben: Optische Mikroskopaufnahme einer mikroporösen 3C-SiC-Elektrode, die durch einen patentierten SiC-Konversionsprozess aus einer Graphitplatte hergestellt wurde.*

*Rechts: Optische Mikroskopaufnahme der Elektrodenoberfläche mit 1000-facher Vergrößerung, die die kristalline Qualität zeigt.*

*Links: Elektronenmikroskopieaufnahme der oben gezeigten 3C-SiC-Oberflächen.*

In der Realität ist die Lebensdauer wegen Verunreinigungen (Fremdatome) und Kristalldefekten im SiC deutlich kleiner, so dass Ladungsträgerrekombinationen schon nach weniger als 10  $\mu\text{m}$  Weglänge stattfinden. Nur etwa 5% der durch Licht erzeugten Ladungsträger würden zur Wasserspaltung beitragen. In AP 1 wurden unterschiedliche mikroporöse 3C-SiC-Elektroden optimiert, die für die photogenerierten Ladungsträger sehr kurze Wege zur Oberfläche sicherstellen und gleichzeitig die Lichtabsorption in der vollen Tiefe ermöglichen. Im Vergleich zu planaren Schichten vergrößert sich mit diesen mikroporösen Elektroden die aktive Oberfläche um mehr als einen Faktor 200. In Abb. 6 (rechts) ist diese Situation schematisch dargestellt. Abb. 5 zeigt die reale Mikrostruktur einer 3C-SiC-Elektrode, die mit dem Yellow-SiC Konversionsverfahren hergestellt wurde.

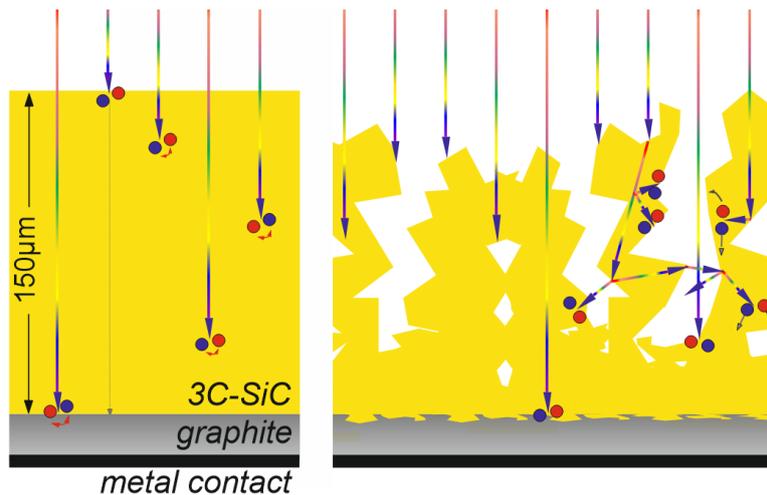


Abb. 6: Einfallendes Licht auf eine 3C-SiC-Oberfläche.

Links: In einer planaren 3C-SiC-Schicht tragen nur oberflächennahe Ladungsträger zur Gasbildung bei.  
Rechts: Eine mikroporöse Schicht bietet eine deutlich größere Oberfläche für die Wasserspaltung und verkürzt den Weg für die Ladungsträger zur Oberfläche.

## Dotierung der SiC-Elektroden

Um 3C-SiC sowohl auf der Sauerstoff- als auch auf der wasserstofferzeugenden Elektrodenseite verwenden zu können, ist jeweils eine p- und eine n-Dotierung notwendig. Die n-Dotierung mit Stickstoff und damit die Leitfähigkeit, konnte kontrolliert durch eine Stickstoff-Gasatmosphäre während des Konversionsprozesses erfolgen. In den Voruntersuchungen wurden schon stickstoffdotierte Elektroden mit beliebiger, nicht kontrollierbarer Dotierstärke verwendet.

Die Herstellung einer p-Dotierung in SiC ist sehr viel aufwändiger realisierbar – kommerziell ist p-dotiertes SiC nicht erhältlich. Die Aufgabe war zunächst die omnipräsente „Stickstoffverunreinigung“ zu vermeiden, bzw. mindestens bis in den ppm-Bereich zu reduzieren. Die siliziumhaltige Precursorkomponente enthält gegenwärtig ca. 640 ppm Stickstoff. Stickstoffverunreinigungen in Kombination mit einer p-Dotierung führen zu einer ungewollten Donator-Akzeptor-Rekombinationslumineszenz, die die Anzahl verfügbarer Ladungsträger für die Wasserspaltung bis auf wenige Prozent reduziert. Sobald die Stickstoffkonzentration unterhalb der Akzeptorkonzentration (Bor und/oder Aluminium) liegt, bricht die Lumineszenz zusammen und die photogenerierten Ladungsträger stehen für die Wasserspaltung zur Verfügung.

Experimentell hat sich ergeben, dass eine Akzeptordotierung von  $10^{16}$  bis  $10^{17}$  At./cm<sup>3</sup> ein guter Kompromiss ist, um eine ausreichende Elektrodenleitfähigkeit zu gewährleisten. Eine höhere Dotierung führt wieder zu einer deutlichen Reduktion der Ladungsträgerlebensdauer. Als p-Dotierelement wurde Aluminium gewählt, da hier im Vergleich zu Bor keine parasitären elektrischen Effekte auftreten. Für die Reduktion der Stickstoffdotierung bedeutet dies, dass diese unter  $10^{16}$  bis  $10^{17}$  At./cm<sup>3</sup> liegen muss. Diese Grenze konnte durch Optimierungen bei der SiC-Herstellung unterschritten werden (siehe Abb. 3).

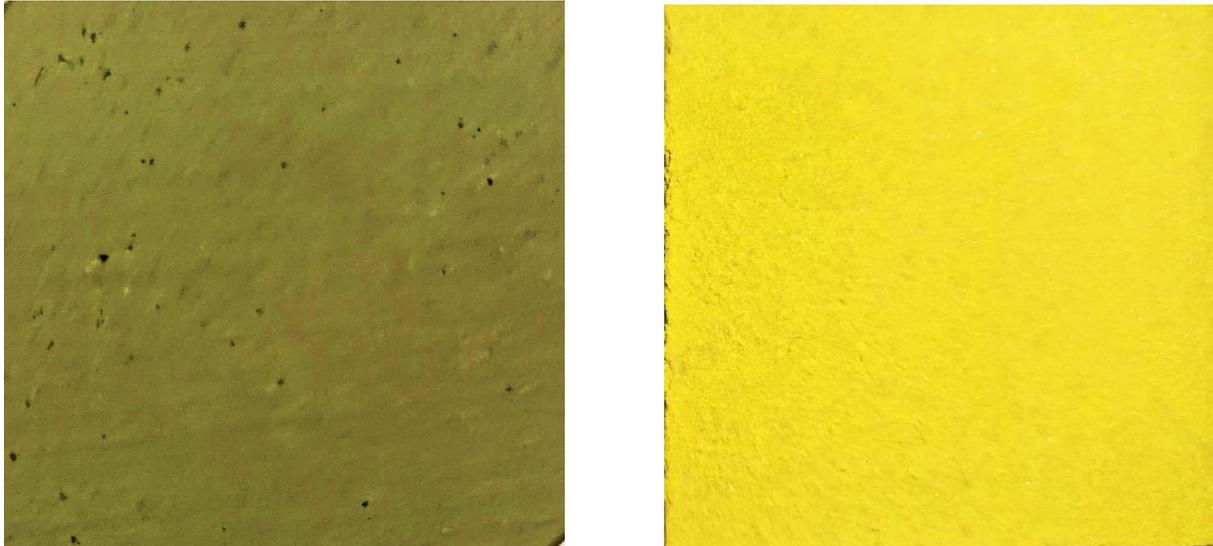


Abb. 7: Stickstoffdotierte 3C-SiC-Elektroden.

Links: Ausgangssituation. Stickstoffdotierung ca 120 ppm und zusätzlichen Verunreinigungen mit Eisen, Bor und Aluminium führen zu einer grünlischen bis grünen Färbung. Rechts: Die Reduktion von Verunreinigungen und die Stickstoffreduktion auf 1 ppm liefert höchstreines 3C-SiC mit gelber Farbe, die wegen der Größe der Bandlücke erwartet wird.

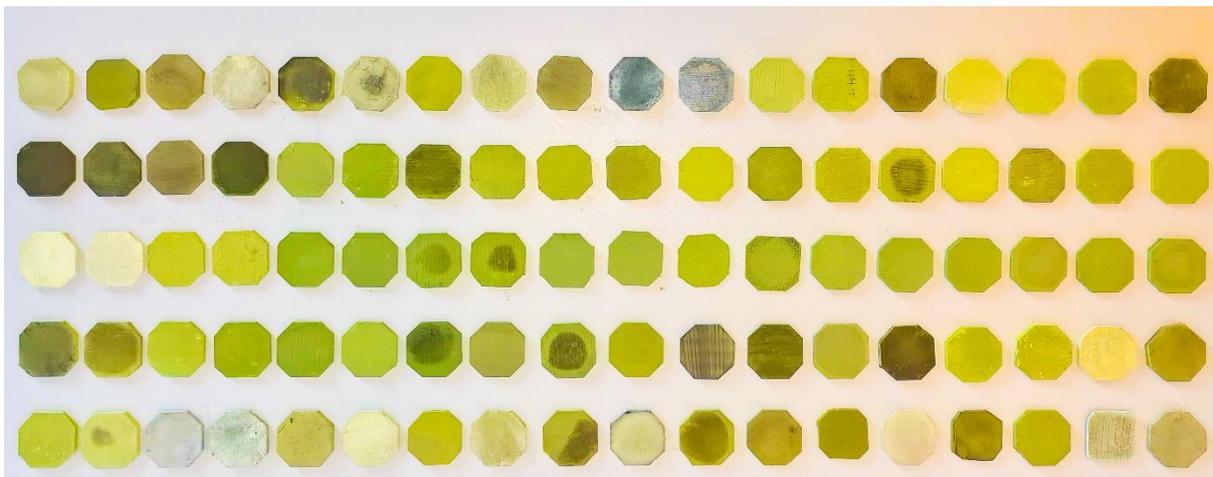


Abb. 8: Eine Reihe unterschiedlich Stickstoff-dotierter 3C-SiC Elektroden.

## Charakterisierung der Elektrodenmaterialien

Die erfolgreiche Dotierung und Elimination ungewollter Dotierungen wurde mit verschiedenen Messmethoden kontrolliert. Restverunreinigungen wurden mittels GDMS (Glow Discharge Mass Spectrometry) bis in den sub-ppm-Bereich ermittelt, die kristalline Struktur mit XRD (X-Ray Diffraction) kontrolliert, optische Eigenschaften mit Raman-Spektroskopie sowie mit optischer Absorption untersucht. Um die elektrischen Eigenschaften zu optimieren und das Elektrolyseverhalten zu optimieren, wurden Kennlinien der Einzelelektroden und des Gesamtsystems mit Elektrolyt, mit und ohne Beleuchtung gemessen. Die Gasentwicklung wurde in-situ mit entsprechenden Sensoren untersucht.

Antragsgemäß wird die Qualität der Dotierung auch in AP 2 fortgesetzt, so dass innerhalb dieser Projektlaufzeit die p- und n-Dotierung für pn-Übergänge nutzbar wird. Mit einem pn-Übergang wird eine effektive Trennung der solarinduzierten Ladungsträger gewährleistet und damit eine Rekombination der Ladungsträger verhindert. Dies ist dann die Basis für die im Antrag beschriebene sehr effiziente Wasserstoffgeneration.

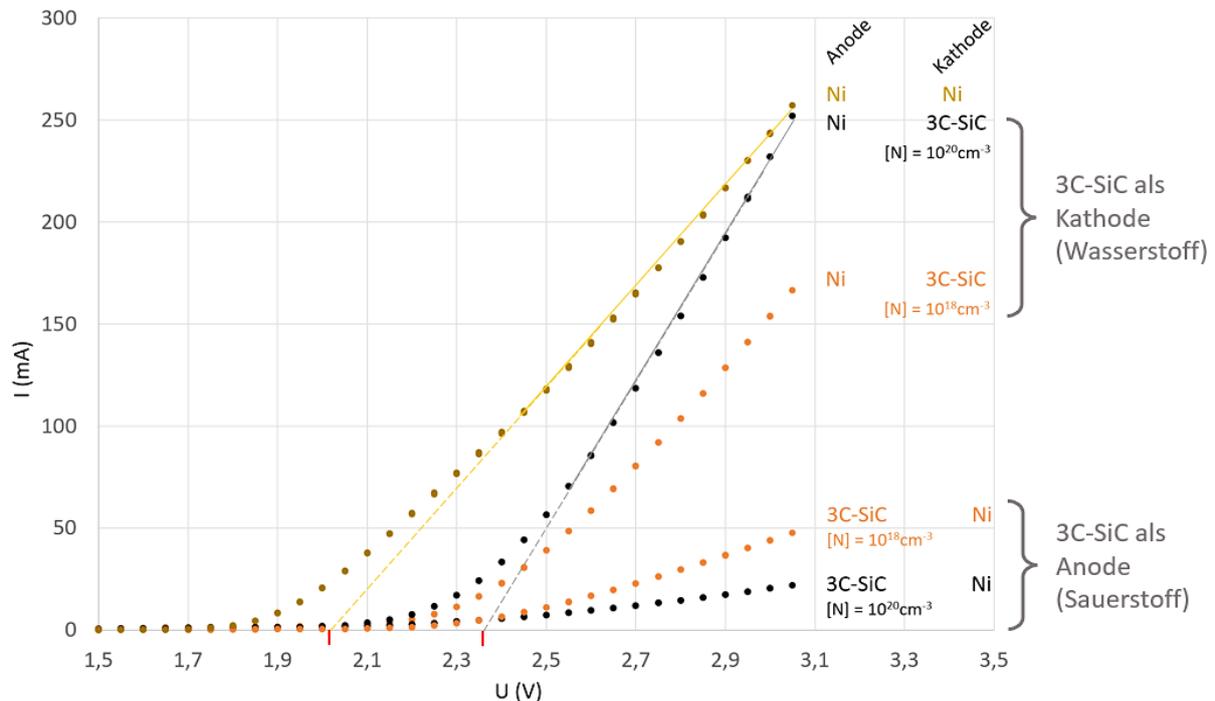


Abb. 9: Strom-Spannungs-Kennlinien verschiedener Elektrodenpaare. Ni wurde als Referenzelektrode verwendet. Exemplarisch ist hier nur die Varianten für 2 unterschiedliche N-Dotierungen des 3C-SiC gezeigt, einmal als Kathode und alternativ als Anode.

Als ein Beispiel für unterschiedliche n-Dotierungen, hier mit Stickstoff, dem üblicherweise verwendeten flachen Donator in SiC, sind in Abb. 9 Strom-Spannungs-Kennlinien für zwei Dotierstärken und jeweils 3C-SiC als Anode, bzw. als Anode mit Nickel-Gegenelektrode gezeigt.

Stark n-dotiertes 3C-SiC als Kathode (in Abb. 9:  $[N] = 10^{18} \text{cm}^{-3}$ ) erreicht bei ca. 3 V die Stromstärke von Ni als Kathode. Bei Umpolung (entspricht ‚n-dotiertes 3C-SiC‘ als Anode) beobachtet man bei 3 V wie erwartet einen deutlich geringeren Strom. Um 3C-SiC auch als Anode nutzen zu können, muss dieses p-dotiert werden, z. B. mit dem typischen Akzeptor Aluminium. Die interpolierten Zersetzungsspannungen bei 2.0 V für Ni – Ni - Elektrodenpaare und bei 2.35 V für Ni – 3C-SiC – Elektrodenpaare weichen wegen der sog. Überspannungen von der theoretischen Zersetzungsspannung von 1.23 V deutlich ab. Die Ursache der gemessenen Überspannungen müssen genauer untersucht werden. Deren Ursache sind apparative Zusatzwiderstände, chemische Reaktionen, elektrische Widerstände uvm.. Diese Einflussgrößen müssen bestimmt werden, um letztlich die Überspannung eines unbekanntes Materials zu bestimmen. Abb. 10 vergleicht die ermittelten Überspannungen für n- und p-dotiertes 3C-SiC, jeweils als Anode, bzw. Kathode eingesetzt, mit Überspannungen anderer Elektrodenmaterialien.

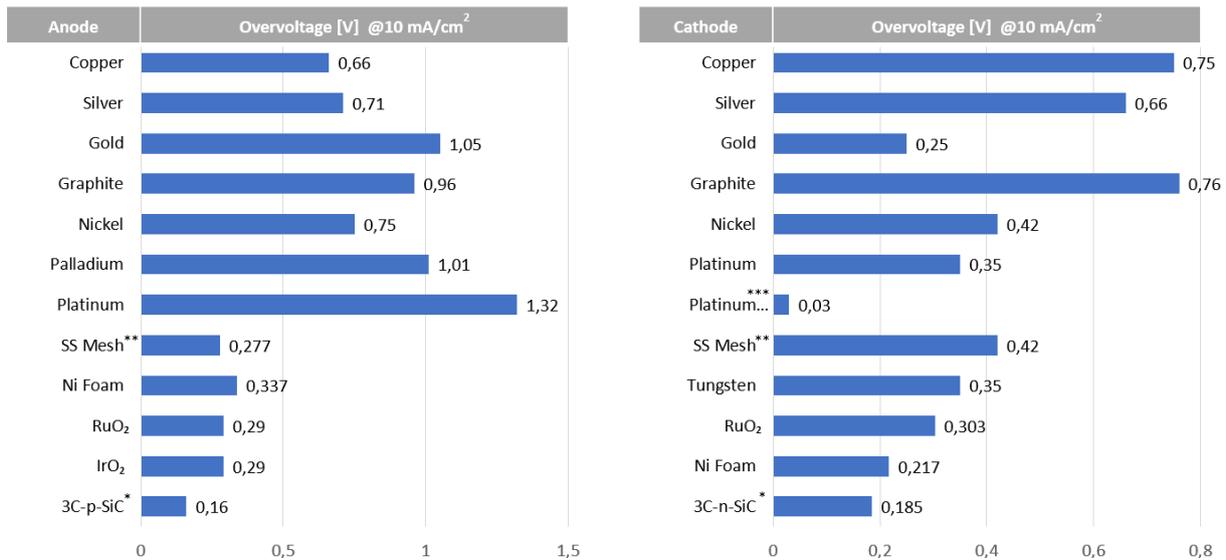


Abb. 10: Überspannungen verschiedener Elektrodenmaterialien.

Die Werte für \*3C-p-SiC und \*3C-n-SiC sind aus eigenen Messungen, alle anderen Daten aus [Hickling 1947].  
\*\*Stainless steel mesh, \*\*\*Platinum platinated (with platinum black).

Abb. 11 zeigt XRD-Spektren von 3C-SiC Elektroden, die bei unterschiedlichen Temperaturen hergestellt wurden. Bei niedrigen Temperaturen (1500°C und 1600°C) beobachtet man noch deutlich amorphe SiC-Anteile, was sich in den größeren Linienbreiten und dem kleineren Signal-Rausch-Verhältnis bemerkbar macht. Bei Umsetzungstemperaturen von 1800°C und 2050°C werden nur noch scharfe Kristallreflexe von kristallinem 3C-SiC beobachtet.

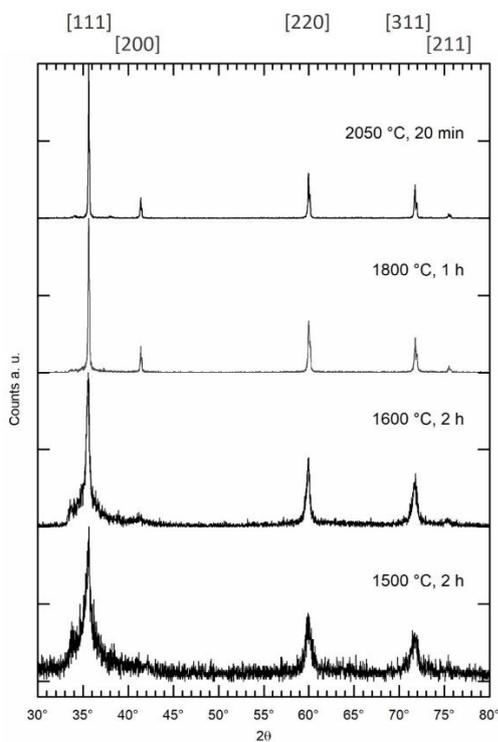


Abb. 11: Analytik.

Röntgenbeugungsmessungen (XRD) an amorphen und kristallinen 3C-SiC Elektroden. Die Kristallinität nimmt mit zunehmender Umsetzungstemperatur zu.

Eine wesentliche Charakterisierung der Elektroden erfolgte über deren elektrische Eigenschaften. Hierzu wurden Kennlinien gemessen, wie z. B. in Abb. 12 gezeigt. Strom-Spannungsmessungen wurden im „Trockenen“, d. h. ohne Elektrolyt, und im Elektrolyten durchgeführt. In Abhängigkeit von der Dotierung kann bei einer Beleuchtung des Halbleiters 3C-SiC eine Änderung der Kennlinie im Vergleich zur Dunkelkennlinie beobachtet werden. So erlauben bereits Messungen ohne Elektrolyt Aussagen über die Eignung der Elektroden für lichtinduzierte Wasserstofferzeugung. Im Elektrolyt wird der Stromkreis durch die beweglichen Ionen im flüssigen Medium geschlossen, was zu deutlich höheren Strömen führt. Diese Messmethode wurde unter anderem verwendet, um den Erfolg von Dotierversuchen zu kontrollieren.

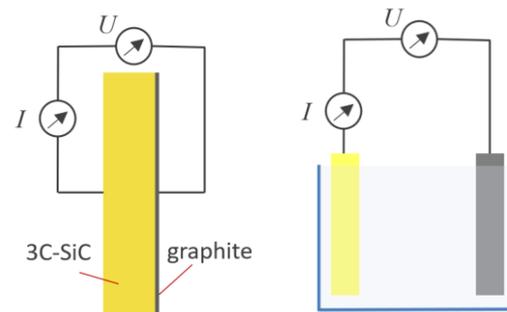
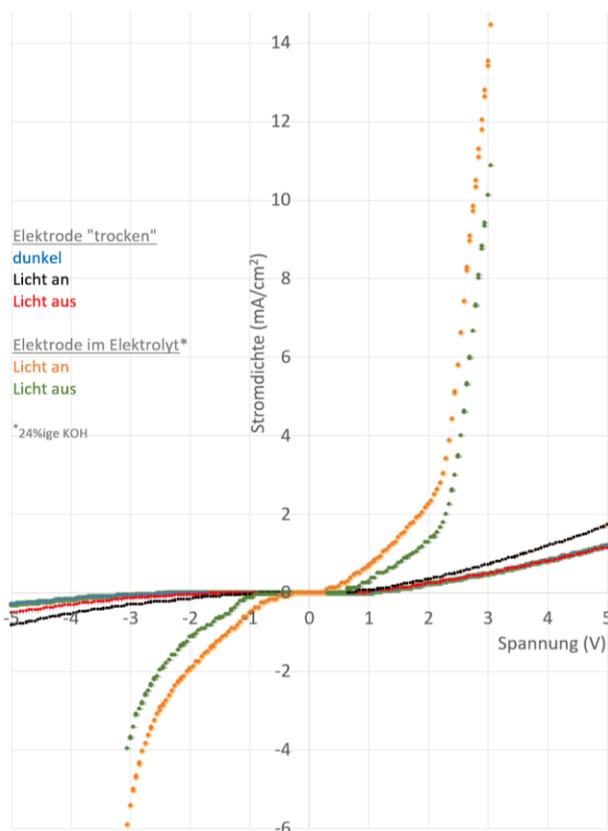


Abb. 12: Strom-Spannungskennlinien einer 3C-SiC-Elektrode.

Oben links: Die 3C-SiC-Elektrode hat auf einer Seite einen vollflächigen Graphitkontakt, über den die Strom-Spannungsmessung durchgeführt wurde.

Oben rechts: Messanordnung im Elektrolyten. Links: Kennlinien der Elektrode mit und ohne Beleuchtung im Trocknen und im Elektrolyten.

Bei dem Einsatz der 3C-SiC-Elektroden als Elektrolyseelektroden konnte ohne weitere Optimierung eine Effizienz von 70% erreicht werden, was vergleichbar mit guten konventionellen Elektrolyseelektroden ist. Hier gibt es noch Potenzial für Optimierungen. Mit p- oder n-dotiertem 3C-SiC und konventionellen Elektroden können die entstehenden Gase bei der Wasserelektrolyse untersucht werden und deren erzeugtes Volumen bestimmt werden. Abb. 13 zeigt hierfür ein Beispiel. N-dotiertes 3C-SiC kann optimalerweise als Kathode eingesetzt werden, da hier Elektronen als freie Ladungsträger zur Verfügung stehen. Auf der Anodenseite müsste p-dotiertes 3C-SiC eingesetzt werden. Im Beispiel in Abb. 13 ist die n-dotierte 3C-SiC Anode deshalb nur eingeschränkt einsetzbar.

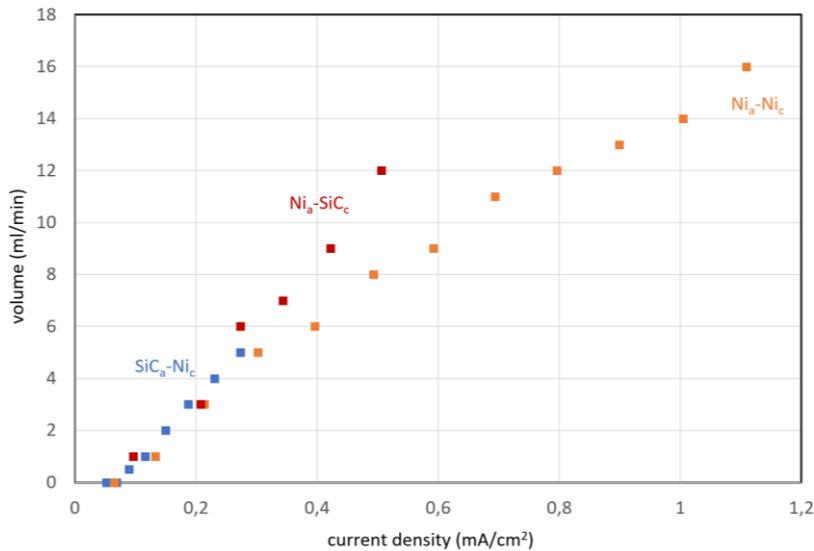


Abb. 13: Analyse der Flüssigkeits- und Gasströme.

N-dotiertes 3C-SiC als Kathode (Index „c“) zeigt bereits bei kleinen Strömen eine höhere Wasserstoffproduktion bei der Wasserelektrolyse als ein Nickel-Elektrodenpaar. Als Anode ist das N-dotierte 3C-SiC weniger gut geeignet.

## Aktueller Stand

Für photoelektrokatalytische Untersuchungen ist neben den bereits genannten Eigenschaften, wie z. B. eine möglichst große Elektrodenoberfläche (poröses SiC), eine effektive Ladungstrennung der durch Licht erzeugten Ladungsträger notwendig. Dies wurde für erste Versuche durch einen Graphitrückkontakt (siehe Abb. 14) erreicht, der mit dem p-dotierten 3C-SiC einen Schottky-Übergang erzeugt.

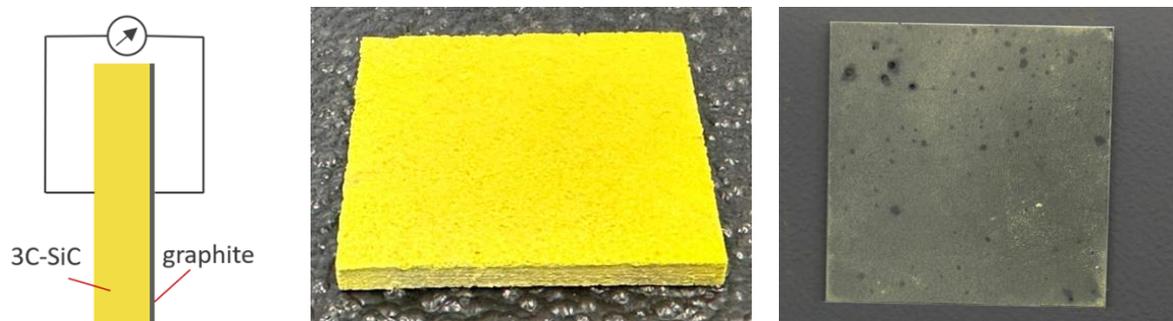


Abb. 14: Schottky-Übergang.

Von links nach rechts: Messanordnung, 3C-SiC Beleuchtungsseite, Graphitrückkontakt.

Wird die p-dotierte 3C-SiC-Elektrode mit sichtbarem Licht (inkl. UV) bestrahlt, entsteht unmittelbar eine Photospannung. Dies entspricht dem linken Band-Band-Übergang ( $E_{VB}-E_{LB}$ ) in Fig. 15 (Inset). Die dazugehörige Kennlinie ist in der Abbildung blau gezeichnet. Regt man die Elektrode dagegen mit infrarotem Licht an, welches kleiner als die Bandlücke von 3C-SiC ist, so kann über einen 2-Photonenprozess mit zwei infraroten Lichtquanten ( $E_{S-LB}$  und  $E_{VB-S}$ ) theoretisch ein Wirkungsgrad von 45% erreicht werden. Für den VIS/UV-Übergang ergibt sich theoretisch ein Wirkungsgrad von 12%. Erstaunlicherweise spiegelt unser Experiment dieses theoretische Verhältnis relativ gut wider. Taucht man diese Elektrode in ein Elektrolytbad ein und beleuchtet sie mit Sonnenlicht oder breitbandigem Licht einer Halogenlampe, wird ohne weitere Hilfsmittel unmittelbar Wasserstoff und Sauerstoff erzeugt. Damit konnte bereits der wichtigste Effekt mit dotiertem 3C-SiC gezeigt werden. Im Weiteren muss die „intermediate band“ Dotierung zusammen mit der p- und n-Dotierung jetzt optimiert werden.

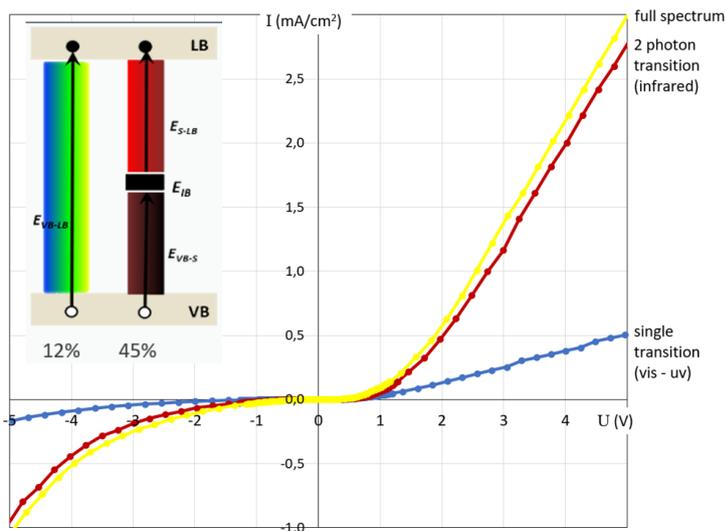
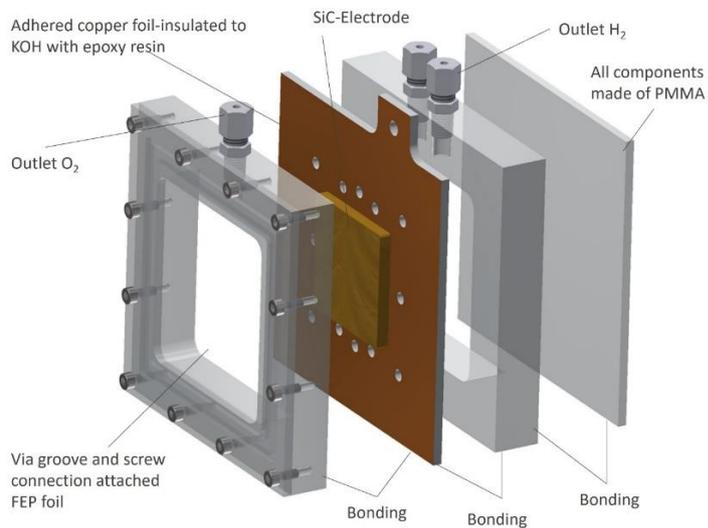
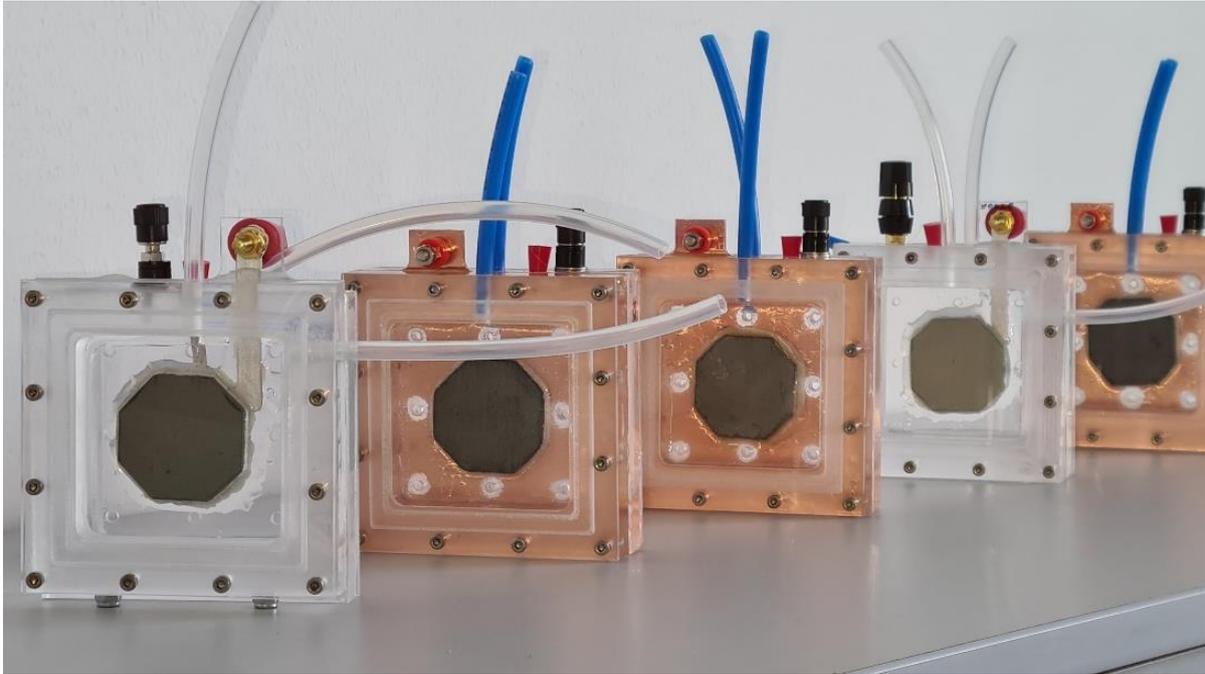


Abb. 15: Drei-Photonen-Übergang. Die drei Kennlinien zeigen das erwartete Verhalten eines Schottky-Übergangs, der sich durch eine Asymmetrie der Kennlinien bezüglich einer Strom-/Spannungsumkehr bemerkbar macht. Die Messung erfolgte im Trockenen unter Beleuchtung mit Licht unterschiedlicher Wellenlängen: im Sichtbaren/UV (vis-uv) und zwei Wellenlängen im Infraroten.

## Photokatalysezellen

Schwerpunkt in AP 2 ist das technische Design der Photokatalysezelle im Labormaßstab. Mit verschiedenen Zellen aus eigenen Vorarbeiten und mit kommerziellen Zellen (Fraunhofer CSP, Halle) liegen bereits Erfahrungen vor. Keine der Zellen konnten von uns vorteilhaft genutzt werden, insbesondere auch in Hinblick auf die spätere technologische Umsetzung und Nutzung des Infrarotbereichs. Deshalb wurde zunächst ein Anforderungskatalog erstellt, der u. A. unsere vergleichsweise großen Elektrodenflächen und die Anordnung der Elektrode als Gasseparator berücksichtigt. Im Rahmen einer Masterarbeit (Leonie Lange, TU Berlin, 2023) wurden mehrere Konzepte erarbeitet, von denen drei auskonstruiert und angefertigt wurden. Im Rahmen dieser Arbeit wurde auch die Auswahl der Zellmaterialien wie z. B. Dichtungen, Gehäuse und optischer Zugang getroffen. Aus dem Laboreinsatz konnte eine finale modulare Konstruktion gewonnen werden, die es in der Elektrodenentwicklungsphase auch erlaubt, den lichtinduzierten Strom zwischen der dotierten SiC-Elektrode und der Gegenelektrode zu messen (Abb. 16 und 17). Die in Abb. 16 dargestellten Zellen wurden zum Projektbeginn durch „Hochskalierung“ bislang verwendeter Zellen erhalten. Alle Komponenten dieser Zelle werden durch Verkleben gefügt und erlauben keinen Elektrodenaustausch. Unter Anderem dieses Manko wurde bei den neu entwickelten Laborzellen (Abb. 17) behoben.



**Abb. 16: Einmalzelle.**

Die abgebildete Laborzelle stand zu Beginn des Projektes zur Verfügung. Die Zelle hat den Nachteil, dass die Elektroden nachträglich nicht mehr ausgetauscht werden können, da alle Komponenten miteinander verklebt werden.

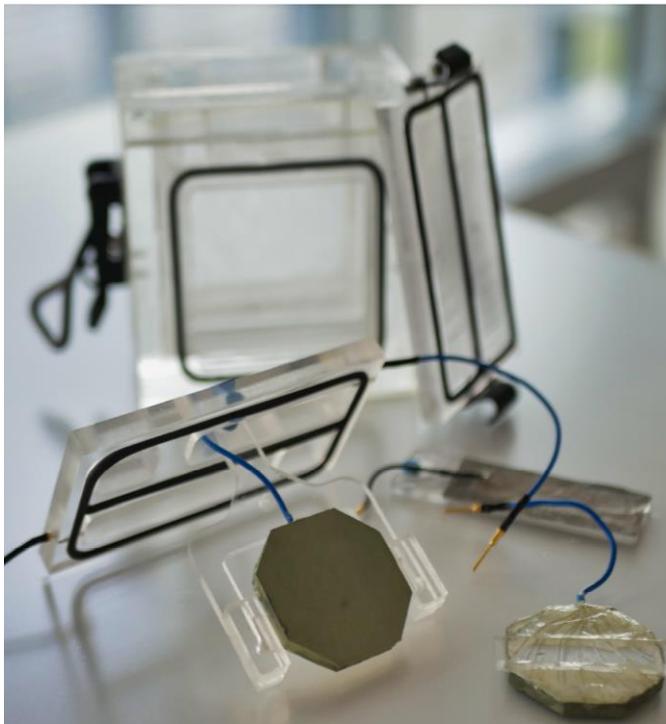
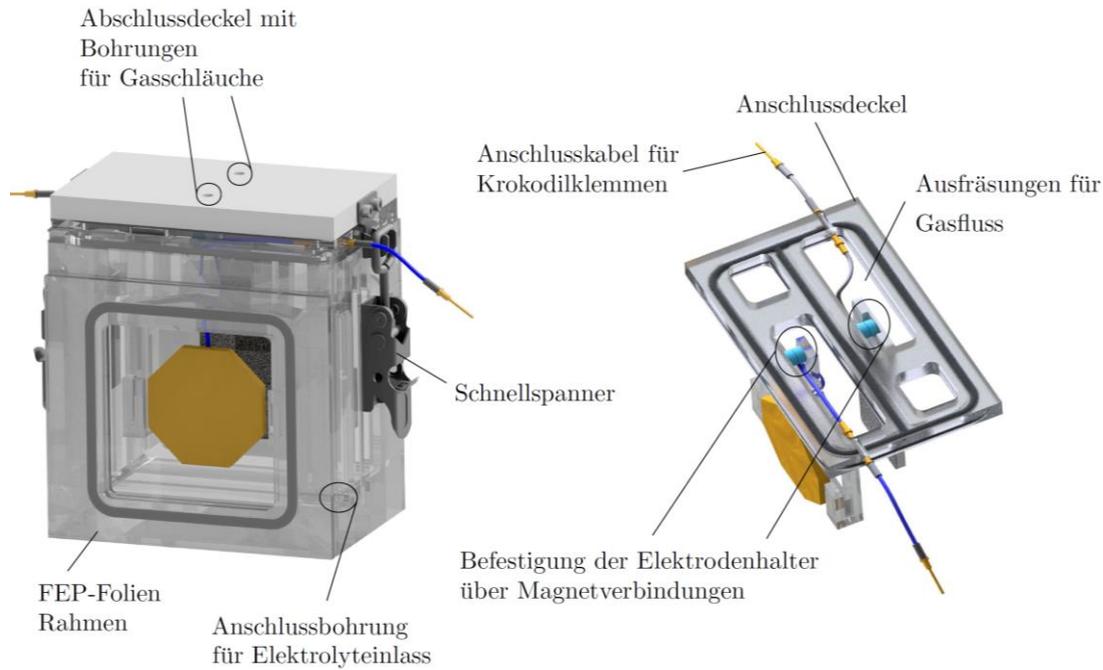


Abb. 17: Finale Laborzelle.  
 Zelle mit Spezialeinsatz für eine Strommessung zwischen der SiC-Elektrode und der Gegenelektrode. In einer solchen Anordnung werden n- oder p-dotierte 3C-SiC-Elektroden vermessen. Bei Nutzung einer 3C-SiC-Elektrode mit pn-Übergang gibt es keine Gegenelektrode und die 3C-SiC-Elektrode trennt die Wasserstoff- von der Sauerstoffgaskammer.

## Optimierung der technischen Auslegung

Im laufenden Projekt wurde im Rahmen einer Konstruktionsstudie eine Laborzelle ohne elektrische Verbindungen realisiert, die nur noch die getrennten Wasserstoff- und Sauerstoffgasbereiche, sowie die 3C-SiC-Elektrode enthält. Abb. 18 zeigt eine solche Laborzelle mit vier 3C-SiC-Elektroden (jeweils  $4 \times 4 \text{ cm}^2$ ). Eine solche Zelle lässt sich leicht skalieren, indem die Anzahl der Elektroden erhöht wird, aber auch durch Verwendung größerer Elektrodenflächen.



Abb. 18: Entwurf Skalierung.

Die dotierten 3C-SiC-Elektroden werden in einem Halterahmen fixiert. Dieser Halterahmen mit dem oberen Gas- und Wasseranschlusspanel lässt sich aus dem Glasbehälter herausziehen, was einen einfachen Elektrodenwechsel erlaubt. Als Laborzelle wurde auch eine Konfiguration mit nur einer Elektrode gebaut. Diese, und die oben dargestellte Viererzelle werden bereits im Labor verwendet. Rechts ist eine Skalierungsmöglichkeit gezeigt.

## Fazit

Die elektrischen Eigenschaften der dotierten 3C-SiC-Elektroden sind sehr vielversprechend, allerdings stehen noch Langzeituntersuchungen für eine abschließende Beurteilung einer Eignung als Ersatzelektroden für die Elektrolyse aus. Hinsichtlich der Photokatalyse beginnen nach den überzeugenden anfänglichen Erfolgen umfangreiche Optimierungsarbeiten, um eine konkurrenzfähige Elektrolyse allein durch Sonnenlicht zu erreichen.

## Literaturverzeichnis

[Hickling 1947] Hickling A., Hill S, Discuss. Faraday Soc. 1947, Bd. Nr. 1, S. 326