

# SIMULATION UND OPTIMIERUNG EINER EFFIZIENTEN BETRIEBSSTRATEGIE FÜR SYSTEMDIENLICHE ELEKTROLYSE

Moritz END(\*), Thorsten SCHNEIDERS

Technische Hochschule Köln, Betzdorfer Str. 2, 50679 Köln (Deutschland), +49 221-8275-4951, moritz.end@th-koeln.de, www.th-koeln.de

**Kurzfassung:** In der vorliegenden Arbeit wird die Modellierung eines Python-basierten PEM-Elektrolyseurs beschrieben, bei dem die charakteristische Wirkungsgradkurve generiert wird und alle Verlustströme der Haupt- und Nebenkomponten simuliert werden. Dieses Modell wird dann verwendet, um durch verschiedene Simulationen eine Betriebsstrategie zu entwickeln, die wirtschaftlich und gleichzeitig systemdienlich ist. Hieraus resultiert eine Betriebsweise für einen PEM-Elektrolyseur, in der ausschließlich bei Stromerzeugungsspitzen der Elektrolyseur auf Nennlast hochfährt und andernfalls bei einem optimalen spezifischen Energieverbrauch in Teillast operiert. So können über 4000 Volllaststunden pro Jahr generiert werden und gleichzeitig die Erzeugungsspitzen von Windenergie gekappt werden. Diese Erzeugungsspitzen-Kappung kann dem Energiesystem als Entlastung dienen.

**Keywords:** PEM-Elektrolyseur-Modellierung, Simulation, Systemdienliche Elektrolyse, Betriebsstrategien, Grüner Wasserstoff, Elektrolyse-Simulation

## 1 Einleitung und Methodik

Mit der Fortschreibung der Nationalen Wasserstoffstrategie (NWS 2023) hat die deutsche Bundesregierung erneut die Bedeutung einer nationalen Wasserstoffindustrie betont und die Ausbauziele für die inländische Elektrolyseleistung bis 2030 von 5 GW auf mindestens 10 GW verschärft [1]. Dabei bekräftigt die NWS 2023, dass die grüne Wasserstoffproduktion durch „systemdienliche Elektrolyse“ gewonnen werden soll. Dies bedeutet unter anderem, dass unter Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit für Elektrolyseure der Stromnetzausbau begrenzt werden soll und flexible Elektrolyseur-Anlagen benötigt werden. Konkreter definiert [2] die Systemdienlichkeit, als Erhalt der Systemstabilität durch Systemdienstleistungen, wie Frequenz- und Spannungshaltung. Wie in der NWS 2023 erwähnt, muss die Elektrolyse neben der Systemdienlichkeit vor allem wirtschaftlich sein. Allerdings stellt die Wirtschaftlichkeit bei der Produktion von grünem Wasserstoff eine erhebliche Herausforderung dar, weshalb eine effiziente Betriebsstrategie unerlässlich ist. [3] Ein entscheidender Parameter dabei ist die Auslastung des Elektrolyseurs bzw. die Anzahl der Volllaststunden, die als Maß für einen wirtschaftlich effizienten Betrieb gelten [4]. Neben den Investitionskosten (CAPEX) und den Betriebskosten (OPEX) ist vor allem eine hohe Anzahl von Betriebsstunden essenziell.

In dieser Arbeit wird mit der Programmiersprache Python auf Literaturbasis ein ganzheitliches Modell eines Proton Exchange Membran(PEM)-Elektrolyseurs erstellt, das die energieintensiven Komponenten berücksichtigt. Mit realen Daten eines kommerziellen Elektrolyseur-Herstellers werden die Ergebnisse dieses Modells validiert. Die Besonderheit an

diesem Modell ist der modulare Aufbau, der während der Programmierung berücksichtigt wird (vgl. Abbildung 1). So kann das Elektrolyseur-Modell modular hochskaliert werden. Um die grüne Wasserstoffproduktion simulieren zu können, wird mit der Hilfe von realen Wetterdaten des Deutschen Wetter Dienstes (DWD) und der Opensource-Bibliothek Windpowerlib die Stromerzeugung von Windenergieanlagen simuliert. Überschüssige Energie der Stromerzeugung, die nicht für die Wasserstoffproduktion genutzt wird, wird virtuell in das Stromnetz gespeist. In der Abbildung 1 sind zudem die Systemgrenzen des modellierten Energiesystems dargestellt.

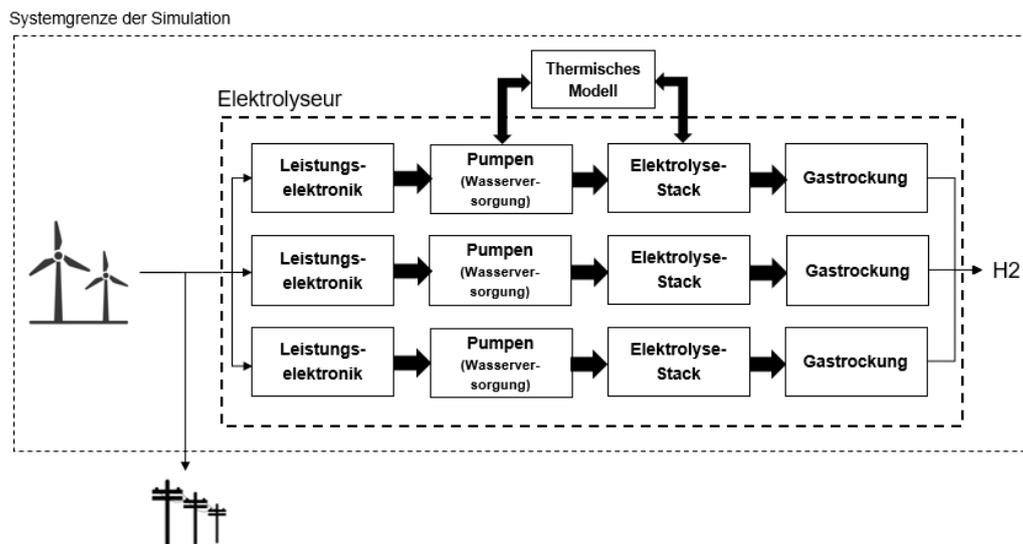


Abbildung 1 Aufbau des Elektrolyseur-Modells und des Energiesystems mit Systemgrenze [eigene Abbildung]

Somit können verschiedene Szenarien mit verschiedenen Betriebsstrategien simuliert werden. Ziel ist jedoch, eine optimierte Betriebsstrategie auszuarbeiten, die eine hohe Anzahl an Volllaststunden vorweist und dabei das Stromnetz nicht zusätzlich belastet.

## 2 Grundlagen Modellierung eines PEM-Elektrolyseurs

Zur Modellierung einer PEM-Elektrolyse-Anlage ist es sinnvoll, den komplexen Aufbau an den Anforderungen für die Simulation zu vereinfachen. Für diese Arbeit wird das Modell auf die in Abbildung 2 dargestellten Komponenten reduziert.

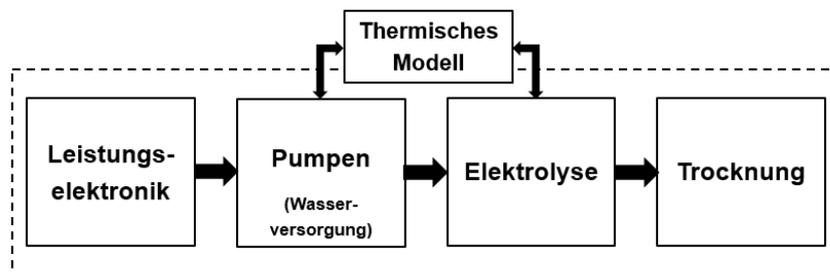


Abbildung 2 Vereinfachtes Modell des Elektrolyseurs [eigene Abbildung, nach [5]]

Dabei hat jeder dieser Energieintensiven Komponenten einen Eigenverbrauch. In den folgenden Unterkapiteln wird die Simulation der einzelnen Komponenten beschrieben.

## 2.1 Leistungselektronik

Der erste Schritt beinhaltet die Anpassung der elektrischen Anforderungen für den Elektrolyseur. Abhängig vom Stromanschluss und der elektrischen Nennleistung des Elektrolyseurs muss der Strom auf ein niedrigeres Spannungsniveau transformiert werden und anschließend für die Elektrolyse gleichgerichtet werden. Für die Leistungselektronik werden Wirkungsgrade bis zu 96 % erreicht [6]. Um auch das Teillastverhalten der Leistungselektronik darzustellen, wird dem Modell je relativem Lastpunkt ausgehend von der Nennlast eine Wirkungsgradkurve hinterlegt. Eine allgemeine Wirkungsgradkurve kann [6] entnommen werden. So kann vereinfacht der Leistungsbedarf der Leistungselektronik ermittelt werden.

## 2.2 Wasserversorgung

Ein entscheidender Anteil des Energieverbrauchs eines Elektrolyseurs ist die Peripherie der Wasserversorgung. Der Volumenstrom des Wassers unterteilt sich in Edukt Wasser der Elektrolyse und Kühlwasser für die Stacks. Dazu kommt ein geringer Teil, der aufgrund der Wasserreinigung und nach der Gastrocknung abgeführt wird. Der Leistungsbedarf der Pumpen für die Wasserversorgung berechnet sich durch die folgenden Gleichungen:

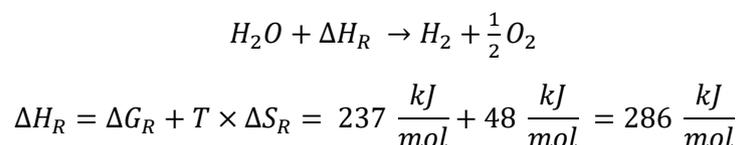
$$\sum P_{Pumpen} = P_{Versorgungspumpen} + P_{Kühlpumpen}$$
$$P_{Pumpe} = \frac{\dot{V}_{H_2O} \times \Delta p}{\eta_{pumpe}}$$

*Formel 1 Berechnung der Pumpenleistung [5]*

Um den Bedarf des Kühlwassers zu berechnen, muss zusätzlich ein Thermisches Modell erstellt werden. In der Literatur gibt es dazu verschiedene Ansätze. Der Volumenstrom des Edukt- und Kühlwassers wurde nach [5] berechnet.

## 2.3 Elektrolyse

Die Hauptkomponente eines Elektrolyseurs ist der Stack, der aus mehreren Elektrolysezellen besteht. In der Elektrolysezelle wird das Wasser mit einer zugeführten Energie in seine Bestandteile Wasserstoff und Sauerstoff gespalten. Die aufzubringende Reaktionsenthalpie entspricht unter Standardbedingungen 286 kJ/Mol, welcher sich in einem Thermischen ( $T \times \Delta S_R$ ) und einem Elektrischen (Gibbs-Energie,  $\Delta G_R$ ) Anteil aufteilt (vgl. Formel 2). [7, 8]



*Formel 2 Chemische Reaktionsgleichung der Wasserelektrolyse [7, 8]*

Mit der freien Reaktionsenthalpie lässt sich nun die theoretische minimale Spannung (reversible Zellspannung;  $U_{rev} = 1,3V$ ) berechnen, die aufzubringen ist, damit die Aufspaltung des Wassers erfolgen kann. Aufgrund realer Bedingungen setzt sich die reale Zellspannung zudem aus der Leerlaufspannung, den Aktivierungsüberspannungen an den Elektroden und der ohmschen Überspannung zusammen (vgl. Formel 3).

$$U_{Zelle} = U_{Leer} + |\eta_{Elektroden}| + U_{Ohm}$$

Formel 3 Berechnung der Zellspannung [9]

In der Literatur gibt es zahlreiche Möglichkeiten, die Zellspannung mit unterschiedlich vielen Parametern zu berechnen. In [10] gibt es einen Überblick, über die verschiedenen Methoden zur Berechnung der Zellspannung. Mit der Berechnung der Zellspannung kann dann für die Elektrolysezelle eine U-I-Kennlinie modelliert werden. Diese ist auch bekannt als Polarisationskurve und ist maßgebend für den Wirkungsgradverlauf bei der Elektrolyse. Die folgende Polarisationskurve ist nach [9, 11, 12] modelliert und wird für diese Arbeit verwendet.

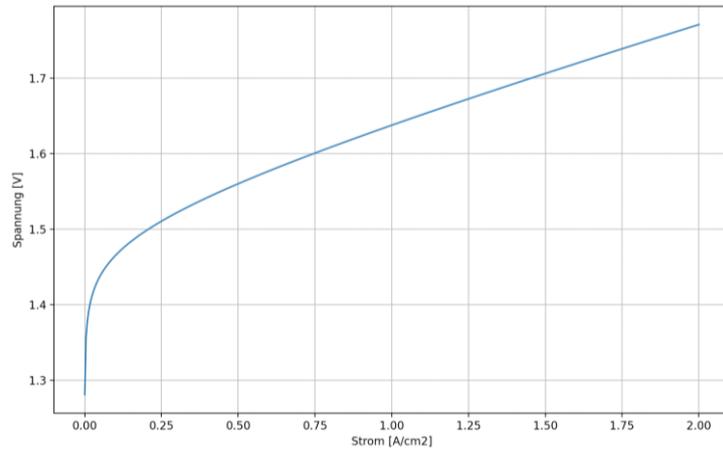


Abbildung 3 Polarisationskurve der Elektrolysezelle [eigene Abbildung]

Nun kann für jeden elektrischen Leistungswert mit der Formel 4 und der Polarisationskurve die Wasserstoffproduktion der Elektrolysezelle in kg pro Zeitschritt berechnet werden. Der Faraday'sche Wirkungsgrad  $\eta_F$  kann ebenfalls der Literatur entnommen werden. Mit dieser Methode lässt Wasserstoffproduktion auf dem gesamten Stack hochskalieren.

$$mfr = \frac{\eta_F \times I_{Zelle} \times M}{n \times F}$$

Formel 4 Berechnung der Wasserstoffproduktionsrate [13]

## 2.4 Gastrocknung

Die Produktgase Wasserstoff und Sauerstoff verlassen den Stack in einem Wasserdampf-Gas-Gemisch. Ein Teil des Wasserdampfes kann durch Abkühlen vom Wasserstoff separiert werden. Die verbleibende Restfeuchtigkeit wird mit einer Adsorptionsdruckanlage entfernt. Für diese Arbeit wird die Heizlast einer Temperaturwechsel-Adsorption (TSA) mit der folgenden Formel berechnet:

$$P_{HZ} = c_{p H_2} \times M_{H_2} \times \dot{n}_{H_2} \times \Delta T$$

Formel 5 Berechnung des Leistungsbedarf der Gastrocknung [5]

Der Leistungsbedarf der Gastrocknung ist abhängig von der gewünschten Reinheit des Wasserstoffs und dessen Anforderungen.

## 2.5 Ergebnisse der Modellierung

Zur Simulation der modellierten Elektrolyse-Anlagen müssen einige Variablen festgelegt werden, die sich an den Werten von kommerziellen Elektrolyseuren richten (Tabelle 1). Hieraus resultiert ein Stack mit 500 kW elektrischer Nennleistung.

Tabelle 1 Festlegen von Variablen

Parameter	Wert
Zellfläche	2500 cm <sup>2</sup>
Zellen pro Stack	56
Nennleistung Stack	500 kW
Betriebstemperatur	50 °C
Ausgabedruck	30 bar

Zunächst wird Leistungsbedarf der Energieintensiven Komponenten über den Verlauf des Betriebspunktes des Elektrolyseurs betrachtet. Zur Vergleichbarkeit sind in Abbildung 4 prozentual angegeben. Auf der X-Achse ist somit die relative elektrische Eingangsleistung dargestellt, wobei 100% die Nennleistung entspricht. Deutlich zu sehen ist der große Leistungsverlust der Pumpen im System. Im Nennlastbereich beträgt der Leistungsverlust durch die Energieintensiven Komponenten ca. 11 %. Im Unteren Leistungsbereich wird zusätzlich eine Heizlast benötigt.

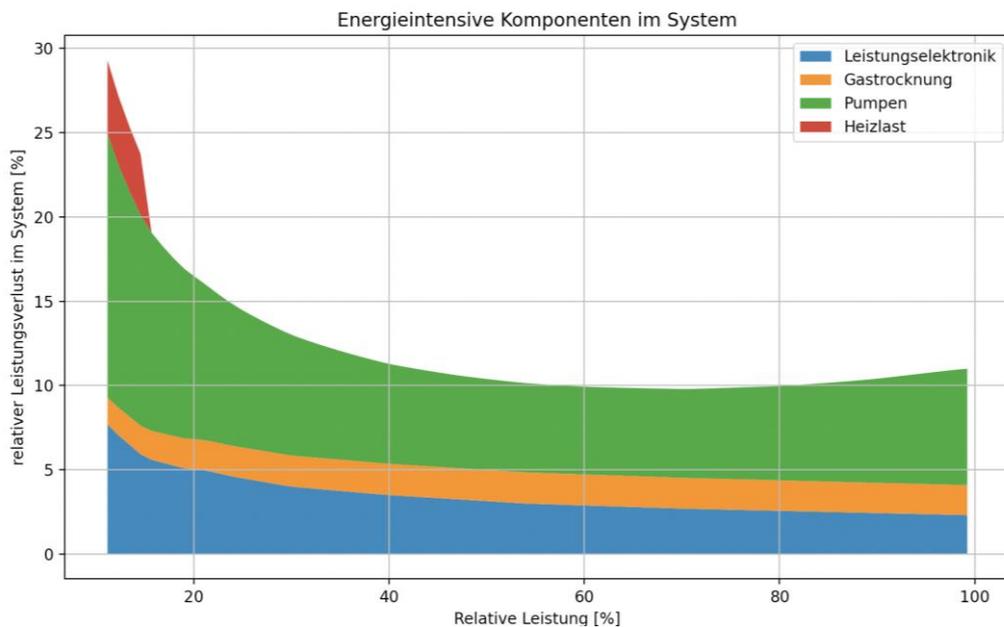


Abbildung 4 Vergleich der Leistungsverluste im System [eigene Abbildung]

Zur Simulation der grünen Wasserstoffproduktion ist jedoch der Gesamtwirkungsgrad der Elektrolyse-Anlage von Interesse. Üblicherweise wird der Wirkungsgrad von Elektrolyseuren als spezifischer Energieverbrauch je Nm<sup>3</sup> produzierten Wasserstoff angegeben. In der Abbildung 4 ist der spezifische Energieverbrauch über den relativen Betriebspunkt des

modellierten Elektrolyseurs dargestellt. Hier wird die typische Charakteristik eines Elektrolyseurs ersichtlich, der im Teillastbereich höhere Wirkungsgrade erreicht.

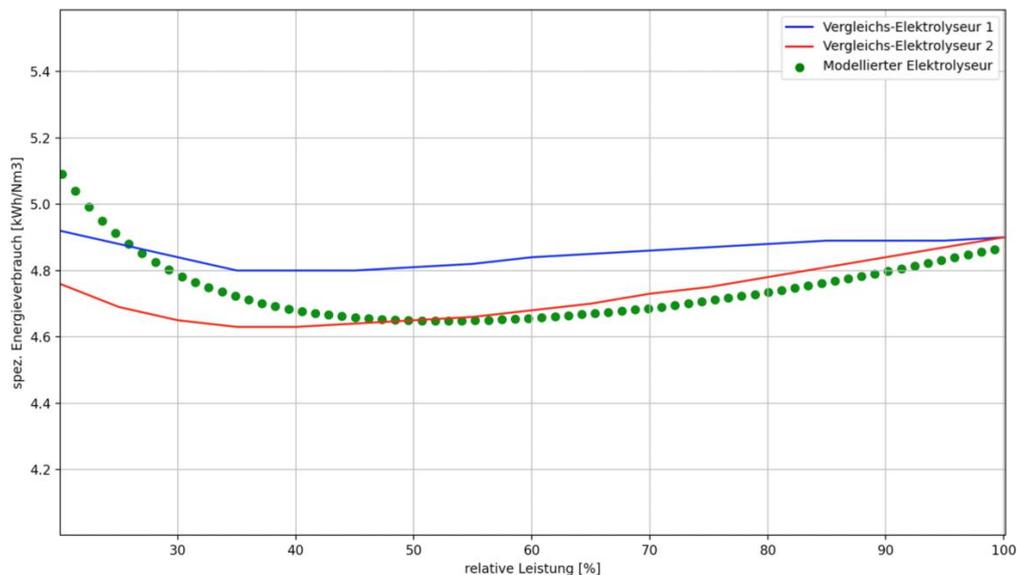


Abbildung 5 Vergleich der spezifischen Energieverbrauchskurven [eigene Abbildung]

Zur Validierung der modellierten Elektrolyse-Anlage dienen die Messdaten von zwei kommerziellen Elektrolyseuren mit einer Nennlast im unteren MW-Bereich. Aufgrund von Betriebsgeheimnissen müssen die Vergleichselektrolyseure hier anonymisiert eingebunden werden. Gleichwohl wird ersichtlich, dass der modellierte Elektrolyseur in dieser Arbeit einen vergleichbaren Verlauf der spezifischen Energieverbrauchskurven hat.

### 3 Dynamische Betriebsbedingungen der Elektrolyse-Anlage

Die bisherige Simulation beruht auf einer statischen Modellierung. Um jedoch die grüne Wasserstoffproduktion durch die Einspeisung von fluktuierenden Erneuerbaren Energien wie Windenergie zu berechnen, müssen die dynamischen Charakteristiken einer Elektrolyse-Anlage implementiert werden.

Grundlegend gehört zur charakteristischen Betriebsbedingung eines Elektrolyseurs der Betriebsbereich. In der Regel ist die maximale elektrische Eingangsleistung die elektrische Nennlast. Für den modellierten Elektrolyseur beträgt diese 2500 kW. Kurze Lasten über den Nennlastbereich sind möglich, erhöhen jedoch die Degradation der Anlage. Neben der maximalen Eingangsleistung hat der Elektrolyseur auch eine Mindestleistung, die aufgrund der charakteristischen Bauweise und der elektrochemischen Bedingungen aufgebracht werden muss. Für kommerzielle Elektrolyseure sind 10-20 % der Nennleistung als minimale Eingangsleistung üblich [14, 15]. Die Abbildung 6 stellt die Problematik des Betriebsbereiches in Verbindung mit einer Windenergieanlage da. Zusehen ist die fluktuierende Stromerzeugung der 5 MW Windenergie für den Monat Juni im Jahr 2020. In Blau hinterlegt ist der Betriebsbereich einer 2500 kW Elektrolyse-Anlage. Es zeigt, dass die Energieerzeugung unterhalb der minimalen Leistung und oberhalb der maximalen Leistung nicht für den Elektrolyseur genutzt werden kann. Dies verdeutlicht auch die Problematik, dass die

Erzeugungsspitzen nicht für die Elektrolyse verwendet werden können und das Energiesystem zusätzlich durch die Einspeisung in das Netz belasten können.

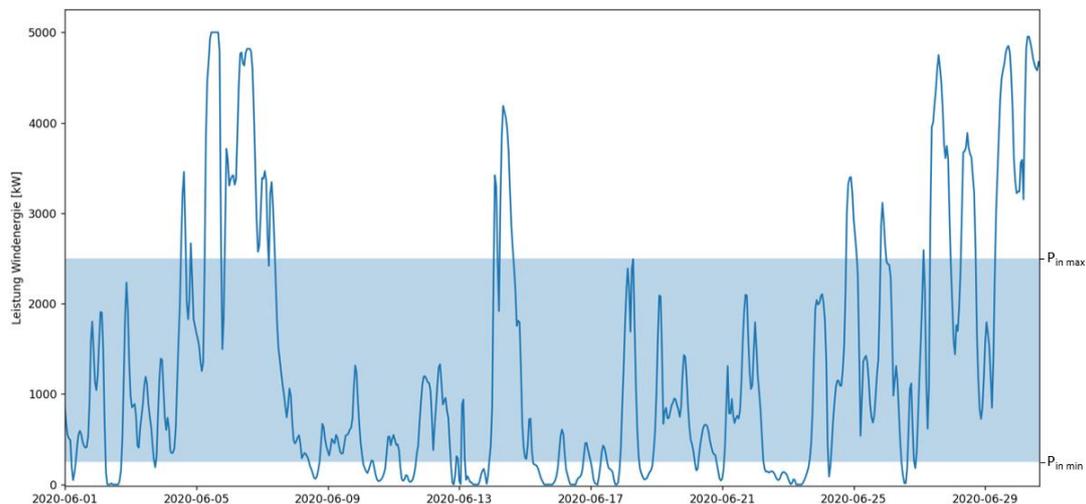


Abbildung 6 Betriebsbereich des Elektrolyseurs kombiniert mit dem Windenergie-Profil [eigene Darstellung]

Neben dem Betriebsbereich sind für die Simulation insbesondere die bereits erwähnten dynamischen Betriebsbedingungen eines Elektrolyseurs von Interesse. Nach Absprache mit verschiedenen Elektrolyseur-Herstellern wurde für diese Arbeit vier verschiedene Betriebsmodi definiert, die so in die Modellierung implementiert sind (vgl. Abbildung 7). Wird ein Elektrolyseur eingeschaltet, befindet sich dieser im *kalten Standby*. Dies bedeutet, dass der notwendige Betriebsdruck und –Temperatur nicht vorhanden sind und der Elektrolyseur bis zur Betriebsbereitschaft 30 min benötigt. Beim *warmen Standby* ist der Elektrolyseur in Bereitschaft und benötigt je nach Betriebsstand 5-10 min bis dieser Betriebsbereit ist. Im Betriebsmodus *Hochfahren* wird Energie aufgewendet, um die Anlage auf die Betriebsbedingungen zu bringen. *Im Betrieb* produziert die Anlage Wasserstoff. Hier sind schnelle Lastwechsel innerhalb von Sekunden zwischen Voll- und Teillast möglich. Somit kann der Elektrolyseur in der Regel die fluktuierende Stromerzeugung gut nachfahren. [16]

Kalter Standby	Warmer Standby	Hochfahren	Im Betrieb
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Die Anlage ist im Standby, Stack und Komponenten sind nicht auf Betriebs-Druck und Temp.</li> <li>• <b>&lt;30 min</b> bis Betriebsbereit</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Die Anlage ist in Bereitschaft, alle Komponenten auf Betriebs-Druck und Temp.</li> <li>• <b>5-10 min</b> bis Betriebsbereit</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Elektrolyseur fährt hoch, Komponenten werden auf die Betriebsbedingungen gebracht</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Anlage produziert Wasserstoff</li> <li>• schnelle Lastwechsel zwischen Nennlast und Teillast sind möglich</li> </ul>

Abbildung 7 Betriebsmodi eines PEM-Elektrolyseurs [eigene Darstellung]

Abschließend wird in diesem Kapitel die modulare Bauweise einer Elektrolyse-Anlage betrachtet, die in der Simulation berücksichtigt wird. Es zeichnet sich ab, dass kommerzielle Elektrolyseur-Hersteller auf eine bestimmte Stack- bzw. Modulgröße in Serieller Fertigung setzen und so verschiedene Anlagengrößen Modular liefern können [16]. In der Simulation

wird somit jeder Stack mit der darauf abgestimmten Peripherie einzeln betrachtet, um so für jeden Stack einen optimalen Betrieb zu gewährleisten.

## 4 Simulation der Betriebsstrategie

Mit dem beschriebenen Modell ist es nun möglich, verschiedene Betriebsstrategien unter verschiedenen Szenarien zu simulieren und zu testen. Für diese Arbeit wird sich auf drei verschiedene Betriebsstrategien in einem Szenario konzentriert und anschließend die Ergebnisse verglichen. Wie zuvor erwähnt, wird eine Windenergie-Anlage mit 5 MW Nennleistung und eine PEM-Elektrolyse-Anlage mit 2,5 MW elektrischer Nennleistung simuliert.

### 4.1 Betriebsstrategie Nach Stromprofil

In der ersten Betriebsstrategie wird das Ziel verfolgt, möglichst viel Wasserstoff zu produzieren und innerhalb des Betriebsbereich nach dem Profil der Windenergieerzeugung zu betreiben. In der Abbildung 8 ist ein Ausschnitt dieser Betriebsweise dargestellt. In grau hinterlegt ist das Profil der Stromerzeugung und farblich markiert stellen 5 Stacks die Wasserstoffproduktion da.

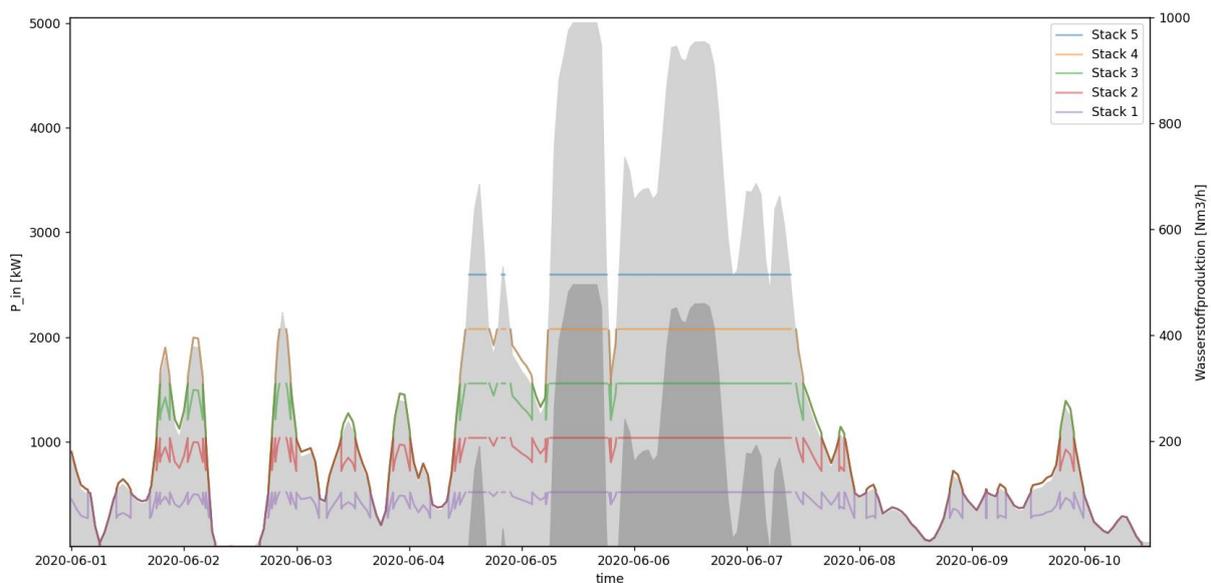


Abbildung 8 Betriebsweise nach Stromprofil [eigene Darstellung]

Die Stacks werden so gesteuert, dass diese immer bei einem optimalen Wirkungsgrad in Teillast betrieben werden. Erst wenn die eingehende Stromleistung gleich oder größer als die Nennleistung der gesamten Anlage ist, werden auch alle Stacks auf Nennleistung betrieben. In der Abbildung 8 ist zu sehen, dass die Erzeugungsspitzen über 2,5 MW nicht zur Wasserstoffproduktion verwendet werden können und somit in das Netz eingespeist werden. In Dunkelgrau ist das Profil der überschüssigen Energie zu sehen.

## 4.2 Betriebsstrategie durch Stromerzeugungsspitzen

In der Öffentlichkeit wird häufig die Wasserstoffproduktion durch überschüssiger Stromerzeugung aus Erneuerbaren Energien diskutiert [17]. Diese überschüssige Energie entsteht durch Erzeugungsspitzen der Erneuerbaren Energien. Naheliegender ist daher, dass eine Wasserstoffproduktion ausschließlich durch überschüssiger Energie aus Erzeugungsspitzen Systemdienlich ist.

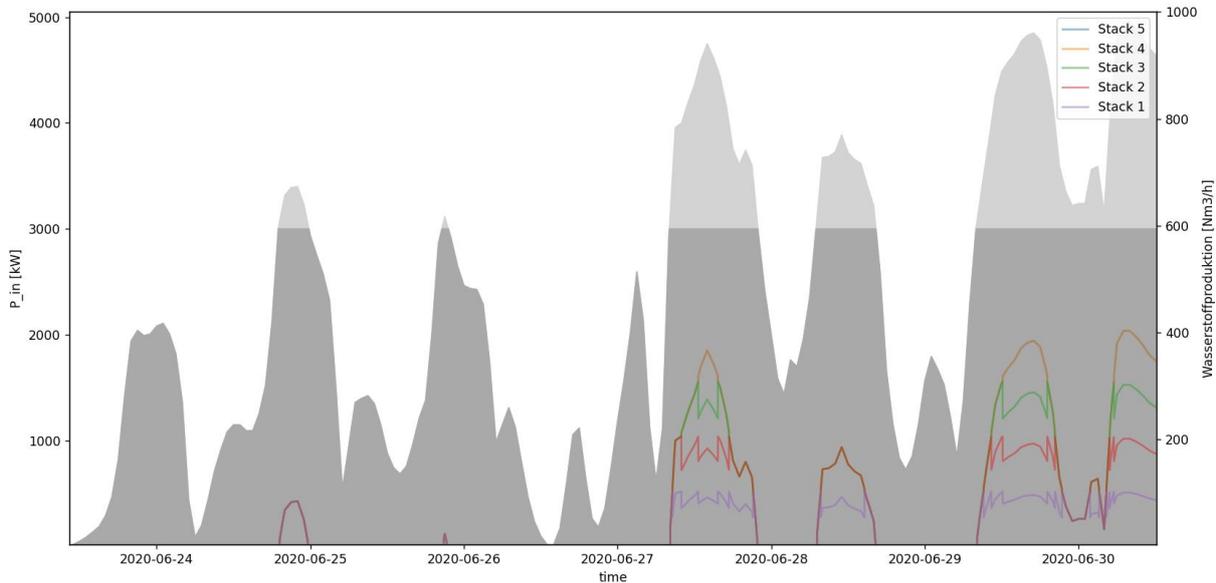


Abbildung 9 Betriebsweise mit Stromerzeugungsspitzen [eigene Darstellung]

Die Abbildung 9 zeigt einen exemplarischen Ausschnitt dieser Betriebsweise. Als Erzeugungsspitze werden hier alle Leistungen über 3 MW definiert. Im Vergleich zur vorherigen Betriebsweise ist dabei zu sehen, dass die Stacks deutlich weniger im Betrieb sind. In dunkelgrau ist das veränderte Stromprofil durch die Wasserstoffproduktion dargestellt, welches so in das Netz eingespeist werden würde. Zu sehen sind die gekappten Erzeugungsspitzen bei der Stromerzeugung über 3 MW. Da die Eingangsleistung nie die 2 MW überschreitet, wird der fünfte Stack nicht betrieben.

## 4.3 Optimierte netzdienliche Betriebsstrategie

Für die dritte Betriebsweise in dieser Arbeit soll eine Kombination aus den vorherigen Betriebsweisen verfolgt werden. So soll eine hohe Auslastung des Elektrolyseurs mit einer für das System dienlichen Betriebsweise gekoppelt werden. Eine Möglichkeit ist den Elektrolyseur und somit alle Stacks bei einem optimalen Wirkungsgrad in Teillast zu betreiben. Wenn dann Erzeugungsspitzen über 3 MW anliegen, werden die Stacks hochgefahren. So kann eine relativ konstante Betriebsweise mit einer hohen Effizienz bei gleichzeitiger Kappung der Erzeugungsspitzen gewährleistet werden. Diese Betriebsweise ist in Abbildung 10 dargestellt. Es ist zu erkennen, wie bei Leistungen unter 3 MW die Stacks in Teillast operierten und bei den Erzeugungsspitzen über 3 MW auf Vollast hochfahren. In dunkelgrau ist das dadurch veränderte Stromprofil ersichtlich.

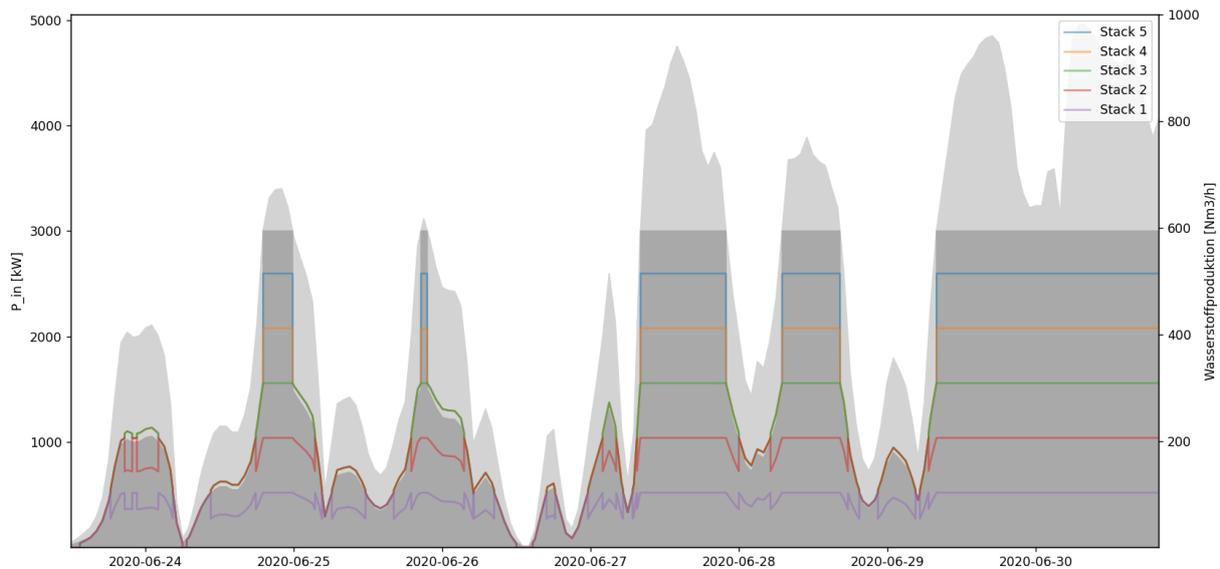


Abbildung 10 Optimierte und netzdienliche Betriebsweise [eigene Darstellung]

#### 4.4 Vergleich der Betriebsstrategien

Um die Betriebsstrategien zu vergleichen, wird exemplarisch das Jahr 2020 in minütlicher Auflösung simuliert. Als Vergleichsgrößen werden die Wasserstoffproduktion in  $\text{Nm}^3/\text{a}$  und Volllaststunden in  $\text{h}/\text{a}$  ausgegeben. Die Ergebnisse der Simulation sind in der Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2 Ergebnisvergleich der Betriebsstrategien

Betriebsstrategie	Wasserstoffproduktion [ $\text{Nm}^3/\text{a}$ ]	Volllaststunden [h/a]
Betriebsstrategie nach Stromprofil	2.482.000	5331
Betriebsstrategie durch Stromerzeugungsspitzen	570.000	1558
Optimierte netzdienliche Betriebsstrategie	2.164.000	4183

Wie zu erwarten, hat die Betriebsstrategie nach Stromprofil die höchste Wasserstoffproduktion und Anzahl an Volllaststunden über das Jahr. Zusehen ist dagegen die geringe Wasserstoffproduktion bei der zweiten Betriebsstrategie durch Stromerzeugungsspitzen und die damit verbundene geringe Anzahl von 1500 Volllaststunden. Mit einer Wasserstoffproduktion von ca. 2 Mio.  $\text{Nm}^3/\text{a}$  und über 4000 Volllaststunden pro Jahr zeigt die optimierte Betriebsstrategie, dass eine Kombination aus hoher Wasserstoffproduktion bei gleichzeitiger Systemdienlichkeit durch Erzeugungsspitzenkappung möglich ist.

## 5 Diskussion

Wie zuvor im Kapitel erwähnt, kann ein Elektrolyseur mit einfacher Betriebsstrategie nach erneuerbaren Stromerzeugungssprofil nicht die Erzeugungsspitzen verwenden. Es ist davon auszugehen, dass diese Erzeugungsspitzen in das Stromnetz eingespeist werden und damit das Energiesystem und Stromnetz zusätzlich belasten. Dagegen könnte eine Betriebsweise nach Stromerzeugungsspitzen sehr Netzdienlich sein. Allerdings zeigen die Ergebnisse in Kapitel 4, dass durch diese Betriebsstrategie lediglich ca. 1500 Volllaststunden pro Jahr erreicht werden können, weshalb ein wirtschaftlicher Betrieb ohne besonderer Förderung schwer vorstellbar ist. Die Ergebnisse der optimierten Betriebsstrategie zeigen anschließend, dass eine Kombination aus einer relativ hohen Anzahl an Volllaststunden mit einer Erzeugungsspitzenkappung möglich ist. Durch diese Kappung der Erzeugungsspitzen kann eine Systemdienliche Elektrolyse gewährt werden.

In dieser Arbeit wird jedoch die Systemdienlichkeit so definiert, dass zu Zeiten von Erzeugungsspitzen durch Windenergie das Stromnetz nicht zusätzlich belastet werden soll. Aus diesem Grund wird eine Betriebsweise des Elektrolyseurs als systemdienlich definiert, die Stromerzeugungsspitzen der Windenergie kappt. Das simulierte Energiesystem hat jedoch seine Systemgrenze an dem Punkt, wo die überschüssige Windenergie in das Stromnetz einspeisen würde. Durch Verschiebung der Grenzen des Energiesystems und Berücksichtigen von weiteren Bestandteilen des Energiesystems, könnten in komplexeren Simulationen genauere Resultate über die System- und Netzdienlichkeit dieser Betriebsstrategie folgen. Allerdings zeigt diese Arbeit eine Möglichkeit, wie eine systemdienliche und gleichzeitig wirtschaftliche Betriebsweise aussehen könnte. Wobei auch hier weitere Parameter betrachtet werden könnten, da hier lediglich die Anzahl an Volllaststunden als ein möglicher Faktor für die Wirtschaftlichkeit der Elektrolyse in Betracht gezogen wird. Des Weiteren können verschiedene Parameter unterschiedlich ausgelegt werden. So kann zum Beispiel die Definition der Erzeugungsspitzen diskutiert werden und der Grenzwertwert von 3000 KW anders definiert werden.

Letztendlich bietet dieses Elektrolyseur-Modell eine Grundlage, weitere Simulationen in verschiedenen Szenarien in unterschiedlicher Komplexität durchzuführen. Je nach Anforderung und Fragestellungen können so verschiedene Resultate folgen.

## 6 Fazit & Ausblick

In dieser Arbeit wird die Python-basierte Modellierung eines ganzheitlichen PEM-Elektrolyseurs aufgezeigt, dessen Energieintensiven Komponenten simuliert werden. Ergebnis ist ein Stack mit der Nennleistung von 500 kW und einem spezifischen Energieverbrauch von 4,9 kWh/Nm<sup>3</sup>. Außerdem können die Leistungsverluste der Peripherie über verschiedene Betriebspunkte dargestellt werden. Die Ergebnisse der Simulation werden mit Daten zweier kommerziellen Elektrolyseur-Hersteller validiert. Um das Elektrolyseur-Modell in einem Energiesystem realistisch simulieren zu können, werden in dem Modell dynamische Betriebsbedingungen implementiert. Für die Simulation wird zudem mit der Hilfe von Windpowerlib 5 MW Windenergie simuliert und die Elektrolyseur-Anlage mit 5 Stacks definiert.

Simuliert werden drei verschiedene Betriebsstrategien: Betriebsweise nach Stromprofil, Betriebsweise durch Erzeugungsspitzen und eine optimierte netzdienliche Betriebsweise. Wie zu erwarten zeigt sich, dass die Betriebsweise nach Stromprofil die höchste Wasserstoffproduktion und Anzahl an Volllaststunden hat. Dagegen hat die zweite Betriebsweise mit 1500 Volllaststunden eine geringe Ausbeute an Wasserstoff. Demgegenüber zeigt sich, dass die optimierte Betriebsstrategie mit über 4000 Volllaststunden und ca. 2 Mio. Nm<sup>3</sup>/a Wasserstoff eine gute Kombination aus Erzeugungsspitzenkappung und Wirtschaftlicher Betrieb sein kann. Diese Kappung der Erzeugungsspitzen ermöglicht eine systemdienliche Elektrolyse.

Somit kann diese Arbeit eine erste Empfehlung für eine wirtschaftliche Elektrolyse bei gleichzeitiger Systemdienlichkeit geben. Darüber hinaus bietet Das Elektrolyseur-Modell weitere Simulationen in verschiedenen Szenarien durchzuführen. Auch kann das Modell beliebig erweitert werden.

## Referenzen

- [1] Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK), Ed., "Fortschreibung der Nationalen Wasserstoffstrategie: NWS 2023," Berlin, Jul. 2023. Accessed: Nov. 30 2023. [Online]. Available: [https://www.bmbf.de/SharedDocs/Downloads/de/2023/230726-fortschreibung-nws.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=1](https://www.bmbf.de/SharedDocs/Downloads/de/2023/230726-fortschreibung-nws.pdf?__blob=publicationFile&v=1)
- [2] Schulze, Y., Müller, M., Faller, S., Duschl, W., Wirtz, F., "Was ist Netzdienlichkeit?," München, May. 2021. Accessed: Nov. 30 2023. [Online]. Available: [https://www.ffe.de/wp-content/uploads/2021/05/20210122\\_Was-ist-Netzdienlichkeit\\_num\\_LV.pdf](https://www.ffe.de/wp-content/uploads/2021/05/20210122_Was-ist-Netzdienlichkeit_num_LV.pdf)
- [3] Smolinka, T., Wiebe, N., Stecherlce, P., "Industrialisierung der Wasser-elektrolyse in -Deutschland: -Chancen und -Herausforderungen für nachhaltigen Wasserstoff für Verkehr, Strom und -Wärme: Studie IndWEDe – Kurzfassung," Forschungszentrum Jülich GmbH, Berlin, Oct. 2018. Accessed: Dec. 1 2023. [Online]. Available: [https://www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2020/09/181127\\_bro\\_a4\\_indwede-studie\\_kurzfassung\\_de\\_v03.pdf](https://www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2020/09/181127_bro_a4_indwede-studie_kurzfassung_de_v03.pdf)
- [4] Svolba, J., Zwickl-Bernhard, S., "Vom Ökonomischen Trade-Off zwischen grüner Wasserstoff- und Stromerzeugung für ausgewählte erneuerbare Energietechnologien in Österreich," Wien, 2023.
- [5] G. H. Tjarks, *PEM-electrolysis-systems for the integration in power-to-gas applications*: RWTH Aachen University, 2017.
- [6] J. R. Rodriguez *et al.*, "Large Current Rectifiers: State of the Art and Future Trends," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 52, no. 3, pp. 738–746, 2005, doi: 10.1109/TIE.2005.843949.
- [7] M. Zapf, *Stromspeicher und Power-to-Gas im deutschen Energiesystem: Rahmenbedingungen, Bedarf und Einsatzmöglichkeiten*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2017.
- [8] J. Töpler and J. Lehmann, *Wasserstoff und Brennstoffzelle: Technologien und Marktperspektiven*, 2nd ed. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2017.
- [9] B. Han, J. Mo, Z. Kang, and F.-Y. Zhang, "Effects of membrane electrode assembly properties on two-phase transport and performance in proton exchange membrane

- electrolyzer cells," *Electrochimica Acta*, vol. 188, pp. 317–326, 2016, doi: 10.1016/j.electacta.2015.11.139.
- [10] P. Olivier, C. Bourasseau, and P. B. Bouamama, "Low-temperature electrolysis system modelling: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 78, pp. 280–300, 2017, doi: 10.1016/j.rser.2017.03.099.
- [11] M. Carmo, D. L. Fritz, J. Mergel, and D. Stolten, "A comprehensive review on PEM water electrolysis," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 38, no. 12, pp. 4901–4934, 2013, doi: 10.1016/j.ijhydene.2013.01.151.
- [12] H. GORGUN, "Dynamic modelling of a proton exchange membrane (PEM) electrolyzer," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 31, no. 1, pp. 29–38, 2006, doi: 10.1016/j.ijhydene.2005.04.001.
- [13] R. García-Valverde, N. Espinosa, and A. Urbina, "Simple PEM water electrolyser model and experimental validation," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 37, no. 2, pp. 1927–1938, 2012, doi: 10.1016/j.ijhydene.2011.09.027.
- [14] ITM Power GmbH, *Product flyer*. [Online]. Available: [https://assets.website-files.com/5d96e420d858e3ae1cf2c333/5d96e420d858e34dacf2c8b1\\_loE%202019%2C%20Day%201%2C%20Calum%20McConnell%2C%20ITM%20Power.pdf](https://assets.website-files.com/5d96e420d858e3ae1cf2c333/5d96e420d858e34dacf2c8b1_loE%202019%2C%20Day%201%2C%20Calum%20McConnell%2C%20ITM%20Power.pdf) (accessed: 24.05.23).
- [15] Elogen H2 GmbH, *Product sheet*. [Online]. Available: [https://elogenh2.com/wp-content/uploads/2021/04/Elogen\\_Product\\_sheet-Elyte260.pdf](https://elogenh2.com/wp-content/uploads/2021/04/Elogen_Product_sheet-Elyte260.pdf)
- [16] Sartory, M., Justl, M., Trattner, A., Klell, M., "Analyse des Betriebsverhaltens einer Power-to-Gas Anlage mit modularer Hochdruck-PEM-Elektrolyse," 2018, doi: 10.3217/978-3-85125-586-7.
- [17] J. Beck, *Indirekte Speicherung elektrischer Energie mit Hilfe von Wasserstoff*, 1st ed. Hamburg: Diplom.de, 2015.